

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

Научный журнал

2023

№ 1

Свидетельство о регистрации
ПИ № ФС 77-83494 от 24 июня 2022 г.
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций



Национальный исследовательский
Томский государственный университет
2023

Учредитель:
Национальный исследовательский Томский государственный университет

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ ЖУРНАЛА
«ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ
ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ»**

Ю.М. Михайлов – председатель редакционного совета, д-р хим. наук, профессор, академик РАН, почетный доктор НИ ТГУ
Э.В. Галажинский – д-р психол. наук, профессор
И.М. Донник – д-р биол. наук, профессор, академик РАН
С.А. Караганов – д-р ист. наук, профессор
М.П. Кирпичников – д-р биол. наук, профессор, академик РАН
В.П. Чехонин – д-р мед. наук, профессор, академик РАН
А.Б. Ворожцов – д-р физ.-мат. наук, профессор

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ ЖУРНАЛА

А.Б. Ворожцов – главный редактор, д-р физ.-мат. наук, профессор
М.Г. Хмелева – ответственный секретарь, канд. физ.-мат. наук
Д.Ю. Баланев – канд. психол. наук
С.М. Бобровников – д-р физ.-мат. наук
Н.А. Глущенко – канд. ист. наук
В.М. Грузнов – д-р техн. наук
Е.А. Данилова – д-р полит. наук
А.Н. Ищенко – д-р физ.-мат. наук
В.А. Кагадей – д-р физ.-мат. наук, профессор
Ю.В. Кистенев – д-р физ.-мат. наук, профессор
М.И. Лернер – д-р техн. наук
А.С. Самойлов – д-р мед. наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН
В.И. Сачков – д-р хим. наук, доцент
В.Г. Султанов – д-р физ.-мат. наук
Н.Н. Сысоев – д-р физ.-мат. наук, профессор
С.Э. Шипилов – д-р физ.-мат. наук
А.П. Шкуринов – д-р физ.-мат. наук, профессор, член-корреспондент РАН

**EDITORIAL COUNCIL
LIFE SAFETY/
SECURITY TECHNOLOGIES**

Yuri M. Mikhailov – Chairman of Editorial Council, Dr.Sc. (Chemistry), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences, Honorary Doctor of TSU
Eduard V. Galazhinskiy – Dr.Sc. (Psychology), Professor
Irina M. Donnik – Dr.Sc. (Biology), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
Sergey A. Karaganov – Dr.Sc. (History), Professor
Mikhail P. Kirpichnikov – Dr.Sc. (Biology), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
Vladimir P. Chekhonin – Dr.Sc. (Medicine), Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences
Alexander B. Vorozhtsov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

EDITORIAL BOARD

Alexander B. Vorozhtsov – Editor-in-Chief, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Marina G. Khmeleva – Executive Editor, Cand.Sc. (Physics and Mathematics)
Dmitry Yu. Balanov – Cand.Sc. (Psychology)
Sergei M. Bobrovnikov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Nikita A. Glushchenko – Cand.Sc. (History)
Vladimir M. Gruznov – Dr.Sc. (Engineering)
Elena A. Danilova – Dr.Sc. (Politics)
Alexander N. Ishchenko – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Valery A. Kagadey – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Yury V. Kistenev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Marat I. Lerner – Dr.Sc. (Engineering)
Alexander S. Samoilov – Dr.Sc. (Medicine), Professor of the Russian Academy of Sciences, corresponding member of the Russian Academy of Sciences
Victor I. Sachkov – Dr.Sc. (Chemistry), Associate professor
Valery G. Sultanov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Nikolay N. Sysoev – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor
Sergey E. Shipilov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics)
Alexander P. Shkurinov – Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences

Адрес редакции и издателя: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, Национальный исследовательский Томский государственный университет.

СОДЕРЖАНИЕ

Обращение к читателю (Ю.М. Михайлов)	5
Обращение к читателю (А.Б. Ворожцов)	7

Противодействие техногенным угрозам, включая обеспечение радиологической безопасности при угрозах невоенного характера

Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Мурашко С.Н., Панченко Ю.Н., Аксёнов В.А., Кихтенко А.В., Тивилёва М.И. Исследование эволюции поверхностной концентрации следов высокоэнергетических веществ в отпечатках пальцев поляризационным макрофотографическим и лидарным методами	8
Савельева А.С., Мамонтов Г.В. Синтез гранулированного сорбента на основе цеолита LSX для получения кислорода из воздуха	19
Радкевич А.А., Марченко Е.С., Шишелова А.А. Хирургическая реабилитация больных с нижнечелюстными дефектами с использованием материалов с памятью формы	24
Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Зубань А.В. Влияние фторированных углеводов на концентрационные пределы распространения пламени в смесях H_2-N_2O и CH_4-N_2O	34
Смокотин П.В., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р., Федянин И.С. Радиоволновая бесконтактная система досмотра пассажиров	43
Креницын М.Г. Самодельное 3D-печатное оружие как вызов открытому интернету	52

Противодействие угрозам химической и биологической природы

Максимова Н.К., Малиновская Т.Д., Севастьянов Е.Ю., Черников Е.В., Сергейченко Н.В. Полупроводниковые сенсоры насыщенных паров взрывчатых веществ и мультисенсорные системы на их основе	60
Кистенев Ю.В., Тримасов И., Шкуринов А.П. Подходы к бесконтактной диагностике стрессовых состояний с использованием инфракрасной и терагерцовой спектроскопии	71
Бакина О.В., Глазкова Е.А., Сваровская Н.В., Волков А.М., Ворожцов А.Б., Лернер М.И. Электровзрывной синтез наночастиц ZnO-Ag с высокой антибактериальной активностью	82

Обеспечение кибер- и информационной безопасности

Бартенев А.И., Кагадей В.А., Коряковцев А.С., Полынцев Е.С., Помазанов А.В., Проказина И.Ю., Шеерман Ф.И. Силовая GaN-электроника как фактор роста энергоэффективности преобразователей электрической энергии	91
--	----

CONTENTS

To the reader (<i>Yu.M. Mikhailov</i>)	5
To the reader (<i>A.B. Vorozhtsov</i>)	7
Countering man-made threats, including ensuring radiological safety in non-military threats	
Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Murashko S.N., Panchenko Yu.N., Aksenov V.A., Kikhtenko A.V., Tivileva M.I. Study of the evolution of the surface concentration of traces of high energy substances in fingerprints by polarization macrophotographic and lidar methods	8
Savel'eva A.S., Mamontov G.V. Synthesis of granular sorbent based on zeolite LSX for obtaining oxygen from air	19
Radkevich A.A., Marchenko E.S., Shishelova A.A. Surgical rehabilitation of patients with mandibular defects using shape memory materials	24
Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N., Zuban' A.V. Influence on fluorocarbons flammability limits in the mixtures of H ₂ -N ₂ O and CH ₄ -N ₂ O	34
Smokotin P.V., Shipilov S.E., Satarov R.N., Kuzmenko I.Yu., Muksunov T.R., Fedyanin I.S. Radio-wave non-contact passenger inspection system	43
Kriniteyn M.G. Homemade 3D-printed firearms as a challenge to the open Internet	52
Countering threats of chemical and biological nature	
Maksimova N.K., Malinovskaya T.D., Sevastyanov E.Yu., Chernikov E.V., Sergeychenko N.V. Semiconductor sensors of saturated vapors of explosives and multisensor systems based on them	60
Kistenev Yu.V., Trimassov I., Shkurinov A.P. Approaches to non-contact diagnostics of stress conditions using infra-red and terahertz spectroscopy	71
Bakina O.V., Glazkova E.A., Svarovskaya N.V., Volkov A.M., Vorozhtsov A.B., Lerner M.I. Electroexplosive synthesis of ZnO-Ag nanoparticles with high antibacterial activity	82
Ensuring cyber and information security	
Bartenev A.I., Kagadey V.A., Koryakovtsev A.S., Polyntsev E.S., Pomazanov A.V., Prokazina I.Y., Sheyerman F.I. GaN power electronics as a driver of energy efficiency growth in electrical energy converters	91

doi: 10.17223/7783494/1/1

ОБРАЩЕНИЕ К ЧИТАТЕЛЮ

Обеспечение здоровья, благополучия, социальной защищенности и жизненного комфорта человека является по сути высшей гуманистической целью развития современного общества. Эта непростая и многогранная задача, несмотря на имеющиеся успехи, к настоящему времени, как показывает мировой опыт, лишь только приближается к своему возможному решению по отдельным направлениям, оставаясь далеко от идеального исполнения. Непрекращающиеся в последние десятилетия конфликты разного характера в различных регионах мира свидетельствуют о постоянно возникающих больших проблемах в обеспечении безопасной жизни человека.

Руководство России уделяет данному вопросу постоянное внимание, и он, безусловно, имеет первостепенное значение.

Так, Указом Президента Российской Федерации от 02.07.2021 № 400 «О стратегии национальной безопасности» утвержден новый доработанный с учетом происходящих изменений документ взамен утратившего силу Указа Президента Российской Федерации от 31 декабря 2015 № 683 «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации». В новой стратегии более полно и системно учитываются все ключевые аспекты национальной безопасности нашего государства, часть из которых, касающаяся в первую очередь вопросов безопасности человека, затрагивается в настоящей статье. Хотя следует отметить, что во многих случаях разделить их трудно и, более того, нецелесообразно.

Наличие многоаспектных угроз жизни и благополучию человека, зачастую взаимосвязанных, всегда определяло стремление Homo sapiens к созданию комплексной системы своей безопасности. С древних времен самые разные опасности, исходившие из окружающего мира – «неживой» и «живой» природы, от человеческого сообщества или отдельных его представителей, угрожали человеку и препятствовали достижению отмеченной цели. Ярко и со всей очевидностью они проявляются в последнее время.

Происходящие изменения климата, природные катаклизмы, начиная от землетрясений и заканчивая рисками возможных дрейфов полюсов Земли или глобальных изменений солнечной активности, а также биологические опасности в виде болезней и эпидемий, вызванных бактериями, вирусами и микроорганизмами иной природы, болезни иной этиологии, обусловленные в том числе генетическими особенностями, травмами и т.д., – все это опасности, подстерегающие человека со стороны природы, включая природу самого человека.

Опасности, исходящие от общества, обычно характеризуются как социальные и являются весьма распространенными. Здесь и проявление расовой, если даже не дискриминации, то неуважения, и гендерная проблематика, и последствия исторического доминирования стран мировых лидеров над развивающимися странами, включая проблемы масштабной миграции населения из одних в другие, и вопросы еще встречающегося рабства, и иные аспекты насилия над личностью со стороны как режимов, так и определенных кланов, включая криминальные. Среди этих опасностей, к сожалению, есть и те, которые имеют религиозную природу. Например, искаженная трактовка религиозных ценностей радикалами от различных конфессий, приводившая в различные временные эпохи к террору, сопровождающемуся не просто притеснением инаковерующих, но и их физическим уничтожением, масштабными человеческими жертвами. Примеров тому известно достаточно много и из истории, и из современной действительности.

Следует отметить, что часть рисков, порождаемых обществом, имеет техногенную природу. Стремительно развивающиеся технологии, привнесшие много нового и, безусловно, полезного человечеству, имеют, к сожалению, и отдельные отрицательные проявления, которые оно начинает осознавать лишь спустя определенное время.

В первую очередь, это угрозы, связанные с деятельностью человека, которые проявляются в ухудшении экологической обстановки на планете. Среди них, например, широко обсуждаемые выбросы углекислого газа и метана в атмосферу, которые приводят к глобальному изменению климата вследствие парникового эффекта, с чем согласны далеко не все представители научного сообщества. Кроме того, это иные загрязнения окружающей среды, являющиеся следствием несоблюдения промышленными предприятиями соответствующих норм. Это также и замусоривание и океана, и суши бионеразлагаемыми полимерными отходами, и радиоактивное загрязнение окружающей среды в результате катастроф на ядерных объектах, наиболее крупные из которых произошли в Чернобыле и Фукусиме, и масштабные утечки нефти и нефтепродуктов вслед-

ствие аварий при их добыче, транспортировке и хранении. Последствия многих из этих угроз ведет в том числе и к росту числа заболеваний населения Земли.

Стремительное развитие технологий в информационной сфере также несет с собой определенные риски. Например, интернет наряду со всеми его плюсами приносит опасности вброса в информационное пространство недостоверных сведений, оказывающих пагубное влияние на сознание человека, приводя к необходимости обеспечения безопасности психоэмоционального состояния человека.

От одного из последних интенсивно развивающихся достижений человечества – искусственного интеллекта – также исходит опасность. Она заключается в появлении неуправляемого человеком неодоушевленного объекта, принимающего решения на основании цифровых алгоритмов, заложенных в него, с не всегда предсказуемыми последствиями.

Генная инженерия в приложении к сельскохозяйственной продукции, масштабные применения средств защиты растений и минеральных удобрений, внедрение эрзац-продуктов в повседневность также имеют огромные риски для человека и обуславливают необходимость обеспечения безопасности в сфере производства продуктов питания. Из приведенных примеров не следует, что научно-технический прогресс вреден. Они говорят лишь о том, что необходимо более ответственно относиться к вносимым в человеческое общество технологическим новшествам и обеспечить защищенность человека от их нежелательных последствий.

Важность упомянутых аспектов проблемы безопасности человека требует их научного осмысления и более детального обсуждения, в первую очередь, в научном сообществе, а не только в среде политиков, не всегда искренне и обоснованно пользующихся ими для достижения своих политических целей.

В этой связи учреждение научного журнала с названием «Технологии безопасности жизнедеятельности» могло бы в определенной мере способствовать более широкому обсуждению отмеченных стратегических задач.

Создавая такой журнал, хотелось бы поставить перед изданием амбициозную цель – сформировать новую междисциплинарную площадку для научно-практического и философского обсуждения проблем безопасности человека в цепочке «человек–природа–общество–технологии», отводя в нем центральную роль человеку.

Основой тематики создаваемого журнала должна стать синергия двух основных понятий – формирование защищенности (safety) и обеспечение безопасности (security). На его страницах смогут высказать свое независимое мнение ученые разных научных направлений: физики, биологи, экологи, химики, социологи, представители медицинских наук и др.

Решение об учреждении такого издательского проекта принял Национальный исследовательский Томский государственный университет, который много и активно работает в области создания технологий безопасности. Университет имеет большой опыт издательской деятельности. На сегодняшний день он выпускает более 30 журналов, из которых 21 журнал имеет высокие показатели международной цитируемости. Журнал предполагается издавать на русском и английском языках, он будет размещаться в интернет-пространстве.

Руководство университета сделало мне как почетному доктору НИ ТГУ предложение сформировать и возглавить редакционный состав совета, которое мною было с благодарностью принято.

Редакционный совет, в который вошли известные российские ученые, будет координировать издательскую политику журнала, определяя приоритетные направления его развития. Каждый из членов совета сможет способствовать привлечению неординарных статей, вскрывая безграничную проблему, которой посвящается журнал.

Конечно, все затронутые выше вопросы, как и другие, какие-то в большей, какие-то в меньшей степени уже рассматривались на страницах многочисленных изданий. В этой связи учредитель и редакционный совет журнала стремятся к комплексному рассмотрению проблемы не столько в части констатации рисков, сколько в поиске и обсуждении путей и технологий обеспечения безопасной жизни человека.

Юрий Михайлович Михайлов

*председатель редакционного совета, доктор химических наук, профессор,
академик РАН, почетный доктор НИ ТГУ*

Yuriy M. Mikhailov

*Chairman of Editorial Council, Dr.Sc. (Chemistry), Professor,
Academician of the Russian Academy of Sciences, Honorary Doctor of TSU*

doi: 10.17223/7783494/1/2

ОБРАЩЕНИЕ К ЧИТАТЕЛЮ

Перед вами первый номер научного журнала «Технологии безопасности жизнедеятельности», который начинает издавать Национальный исследовательский Томский государственный университет.

Для обеспечения задач ориентирования специалистов различных направлений в новых фундаментальных и прикладных разработках в области обеспечения безопасности личности и общества в целом и создан наш журнал.

Мы ставим амбициозную задачу – создание междисциплинарной площадки для научного обсуждения вышеуказанных проблем в ключе «технологии – человек – общество – государство».

В основе концепции журнала – обеспечение информационной связи между фундаментальными исследованиями в области инновационных технологий безопасности и научно-практической деятельностью предметных специалистов; распространение передовых отечественных и зарубежных научных знаний в обеспечении безопасности. Это необходимо для своевременного ответа на новые вызовы, возникающие в связи с быстро растущей сложностью мировых процессов и появлением принципиально новых угроз (например, COVID-19).

В нашем журнале будут публиковаться результаты оригинальных исследований для формирования научно-технологического задела в обеспечении создания средств противодействия терроризму, техническим, биологическим, социокультурным угрозам и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и развития новых производственных технологий.

Журнал рецензируемый. Контроль за качеством статей осуществляют штат профессиональных рецензентов и редакционный совет, в который вошли академики и другие известные и уважаемые ученые физики, химики, биологи, механики, IT-эксперты, юристы, политологи.

Издатель и редколлегия приложат все силы, чтобы новый журнал реализовал новые идеи и направления, занял достойное место в решении проблем реализации СНТР РФ.

Приглашаем всех потенциальных авторов к сотрудничеству, ждем интересных и актуальных статей.

Александр Борисович Ворожцов

главный редактор, доктор физико-математических наук, профессор

Alexander B. Vorozhtsov

Editor-in-Chief, Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor

ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ ТЕХНОГЕННЫМ УГРОЗАМ, ВКЛЮЧАЯ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ УГРОЗАХ НЕВОЕННОГО ХАРАКТЕРА

COUNTERING MAN-MADE THREATS, INCLUDING ENSURING RADIOLOGICAL SAFETY IN NON-MILITARY THREATS

Научная статья
УДК 535.3; 535.5
doi: 10.17223/7783494/1/3

Исследование эволюции поверхностной концентрации следов высокоэнергетических веществ в отпечатках пальцев поляризационным макрофотографическим и лидарным методами

Сергей Михайлович Бобровников¹, Евгений Владимирович Горлов²,
Виктор Иванович Жарков³, Сергей Николаевич Мурашко⁴,
Юрий Николаевич Панченко⁵, Валерий Анатольевич Аксёнов⁶,
Андрей Владимирович Кихтенко⁷, Мария Ильинична Тивилёва⁸

^{1, 2, 4, 5} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

^{1, 2, 3, 4} *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия*

⁵ *Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия*

^{6, 8} *Сибирский филиал ФКУ НПО «Спецтехника и связь» МВД России, Новосибирск, Россия*

⁷ *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия*

¹ *bsm@iao.ru*

² *gorlov_e@mail.ru*

³ *zharkov@iao.ru*

⁴ *msn_17@mail.ru*

⁵ *yu.n.panchenko@mail.ru*

⁶ *duploduba@mail.ru*

⁷ *kikht@mail.ru*

⁸ *mtivileva@yandex.ru*

Аннотация. Представлены результаты исследования эволюции поверхностной концентрации следов циклотриметилнитриптамина (RDX) в отпечатках пальцев поляризационным макрофотографическим методом и с помощью метода лазерной фрагментации / лазерно-индуцированной флуоресценции. Описана методика оценки поверхностной плотности следов RDX в потожировых отпечатках пальцев на основе попиксельного анализа макрофотографий, сделанных в поляризованном свете. Приведены экспериментальные данные по дистанционному обнаружению частиц RDX в отпечатках пальца. Сопоставление данных прямых измерений суммарной площади следа с данными откликов лидарного обнаружителя ЛФ / ЛИФ дает хорошее согласие.

Ключевые слова: высокоэнергетические вещества, циклотриметилнитриптамин, следы, макросъемка, лазерная фрагментация, лазерно-индуцированная флуоресценция

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Бобровников С.М., Горлов Е.В., Жарков В.И., Мурашко С.Н., Панченко Ю.Н., Аксёнов В.А., Кихтенко А.В., Тивилёва М.И. Исследование эволюции поверхностной концентрации следов высокоэнергетических веществ в отпечатках пальцев поляризационным макрофотографическим и лидарным методами // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 8–18. doi: 10.17223/7783494/1/3

Original article

doi: 10.17223/7783494/1/3

Study of the evolution of the surface concentration of traces of high energy substances in fingerprints by polarization macrophotographic and lidar methods

Sergei M. Bobrovnikov¹, Evgeny V. Gorlov², Viktor I. Zharkov³, Sergei N. Murashko⁴, Yury N. Panchenko⁵, Valery A. Aksenov⁶, Andrey V. Kikhtenko⁷, Maria I. Tivileva⁸

^{1, 2, 4, 5} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

^{1, 2, 3, 4} V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russian Federation

⁵ Institute of High Current Electronics SB RAS, Tomsk, Russian Federation

^{6, 8} Federal Government Institution of Scientific and Production Association "Special Equipment and Telecoms" of the Ministry of the Internal Affairs of the Russian Federation, Novosibirsk, Russian Federation

⁷ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Russian Federation

¹ bsm@iao.ru

² gorlov_e@mail.ru

³ zharkov@iao.ru

⁴ msn_17@mail.ru

⁵ yu.n.panchenko@mail.ru

⁶ duploduba@mail.ru

⁷ kikht@mail.ru

⁸ mtivileva@yandex.ru

Abstract. The results of the study of the evolution of the surface concentration of cyclotrimethylenetrinitramine (RDX) traces in fingerprints by the polarization macrophotographic method and by the method of laser fragmentation/laser-induced fluorescence are presented. A technique for estimating the surface density of RDX traces in fingerprints based on a pixel-by-pixel analysis of macrophotographs taken in polarized light is described. Experimental data on remote detection of RDX particles in fingerprints are presented. Comparison of the data of direct measurements of the total area of the trace with the data of the responses of the LF/LIF lidar detector gives good conformability.

Keywords: high energy substances, cyclotrimethylenetrinitramine, traces, macro photography, laser fragmentation, laser-induced fluorescence

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Bobrovnikov, S.M., Gorlov, E.V., Zharkov, V.I., Murashko, S.N., Panchenko, Yu.N., Aksenov, V.A., Kikhtenko, A.V. & Tivileva, M.I. (2023) Study of the evolution of the surface concentration of traces of high energy substances in fingerprints by polarization macrophotographic and lidar methods. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 8–18. doi: 10.17223/7783494/1/3 (In Russian).

Введение

Переносимые скрытно взрывные устройства (ВУ) можно выявить по ряду демаскирующих признаков, к числу которых относятся следовые количества взрывчатых веществ (ВВ) на руках человека и различных поверхностях, имевших контакт с этими веществами (например, одежда, поверхность ручной клади, крышки, элементы упаковки, рукоятки запоров кузова). Объекты, имевшие газовоздушный или непосредственный контакт с ВУ или ВВ, могут адсорбировать частицы ВВ на своей поверхности и сохранять их довольно длительное время. Попытки избавиться от таких следов далеко не всегда достигают своей цели. Следы ВВ на руках человека сохраняются до нескольких часов, и даже однократное мытье рук с мылом не может гарантировать избавление от их присутствия.

Поскольку само понятие «след» может меняться в зависимости от решаемой задачи, не существует и

общепринятого мнения относительно уровня концентрации, при котором для его характеристики применяют термин «следовые количества». В настоящей работе под следом будет пониматься наслоение микроскопических частиц следообразующего вещества (ВВ) на твердую следовоспринимающую поверхность в результате их переноса с поверхности пальцев рук при контакте. Поверхностная концентрация вещества в следах в этом случае, очевидно, будет зависеть от исходной концентрации ВВ на поверхности пальцев, силы давления пальцев на поверхность объекта, состояния и физических свойств следовоспринимающей поверхности, кратности касания и т.д. Поэтому оценить содержание частиц ВВ в следе априорно не представляется возможным.

Целью работы является определение параметров следов ВВ в отпечатках пальцев, влияющих на эффективность их обнаружения методом лазерной фрагментации / лазерно-индуцированной флуорес-

ценции (ЛФ / ЛИФ). Для этого будет исследована микроструктура следов и проведено экспериментальное исследование возможности их дистанционного обнаружения методом ЛФ/ЛИФ.

Кратко суть метода ЛФ / ЛИФ состоит в использовании эффекта фотодиссоциации (фотофрагментации, фотолиза) оптически малоактивных молекул с целью образования характеристических фрагментов, имеющих высокую эффективность в процессе ЛИФ. Выбор в качестве характеристического фрагмента функциональной группы (или ее части) исходного соединения позволяет достоверно определить его принадлежность к конкретному классу соединений. Например, для всех нитросоединений общим в их

структуре является наличие нитро- или нитрозо- групп. Возникающие в процессе фотофрагментации нитросоединений молекулы оксида азота (NO-фрагменты), очевидно, могут служить маркерами исходных соединений [1–17].

Методика создания следов

Для имитации контакта с ВВ указательный палец руки прижимали к поверхности с порошкообразным циклотриметилентринитрамин (RDX). Сила давления ($2,2 \pm 0,2$ Н) при этом соответствовала минимальной силе захвата F , необходимой для удержания на весу двумя пальцами руки предмета массой $m = 200$ г при коэффициенте трения $\mu = 0,5$ (рис. 1).

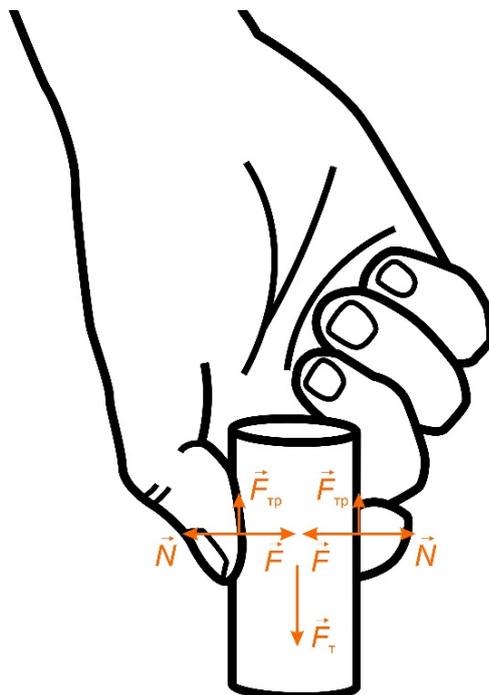


Рис. 1. Захват и удержание предмета на весу

Fig. 1. Capturing and holding an object

Величина F определялась из условия

$$2F_{\text{тр}} \geq F_T,$$

где $F_{\text{тр}} = \mu N$ – сила трения; N – сила реакции опоры, равная по величине F ; $F_T = mg$ – сила тяжести; g – ускорение свободного падения. После переноса частиц ВВ на палец руки его многократно прикладывали к чистой поверхности, оставляя на ней потожировые отпечатки с частицами ВВ. В качестве следовоспринимающей поверхности в работе использовалось предметное стекло (ТУ 9464-012-52876859-2014). Стекла с первым, десятым, двадцатым, тридцатым, сороковым, пятидесятым, шестидесятым, семидесятым, восьмидесятым, девяностым и сотым отпечатками пальца использовались для последующего исследования микроструктуры следов ВВ и

экспериментального исследования возможности их дистанционного обнаружения методом ЛФ / ЛИФ.

Микроструктура следов RDX в отпечатках пальца

Известно, что кристаллические частицы RDX обладают естественной оптической активностью [18]. При прохождении линейно поляризованного света через такие вещества плоскость поляризации света оказывается повернутой относительно своего исходного положения. Явление вращения плоскости поляризации может быть использовано для повышения контраста при распознавании кристаллических частиц RDX на фоне потожирового отпечатка пальца, состоящего из аморфного вещества. Для этого пре-

парат необходимо разместить в проходящем свете между двумя скрещенными поляризаторами.

На рис. 2 представлена схема стенда для макросъемки следов ВВ в проходящем свете с помощью фотоаппарата Canon EOS 500D с объективом EF-S 18-55 f/3.5-5.6 IS. Цифровые изображения предметного стекла, помещенного между двумя скрещенными поляризаторами, до и после нанесения 50-го отпечатка пальца представлены на рис. 3, *a* и *b* соответственно. Из рис. 3, *a* видно, что в изображении «чистого» предметного стекла присутствуют яркие вкрапления – признак непреднамеренного загрязнения поверхности

стекла частицами «постороннего» вещества, вращающего плоскость поляризации проходящего излучения. Ожидаемо, их наличие сохраняется и после нанесения целевого вещества на ту же поверхность (см. рис. 3, *b*). Исключение подобных артефактов проводилось путем попиксельного «вычитания» изображения *a* из изображения *b* в ходе цифровой обработки с помощью программы *ImageJ* (<https://imagej.nih.gov/ij/>) и получения в результате разностного изображения. Результат такой обработки снимков представлен на рис. 3, *c*. Разностные изображения всех образцов представлены на рис. 4.

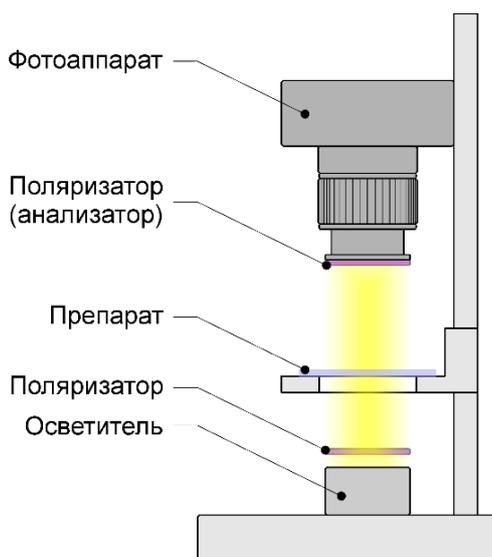


Рис. 2. Стенд для макросъемки следов ВВ в проходящем свете

Fig. 2. Stand for macro photography of traces of HES in transmitted light

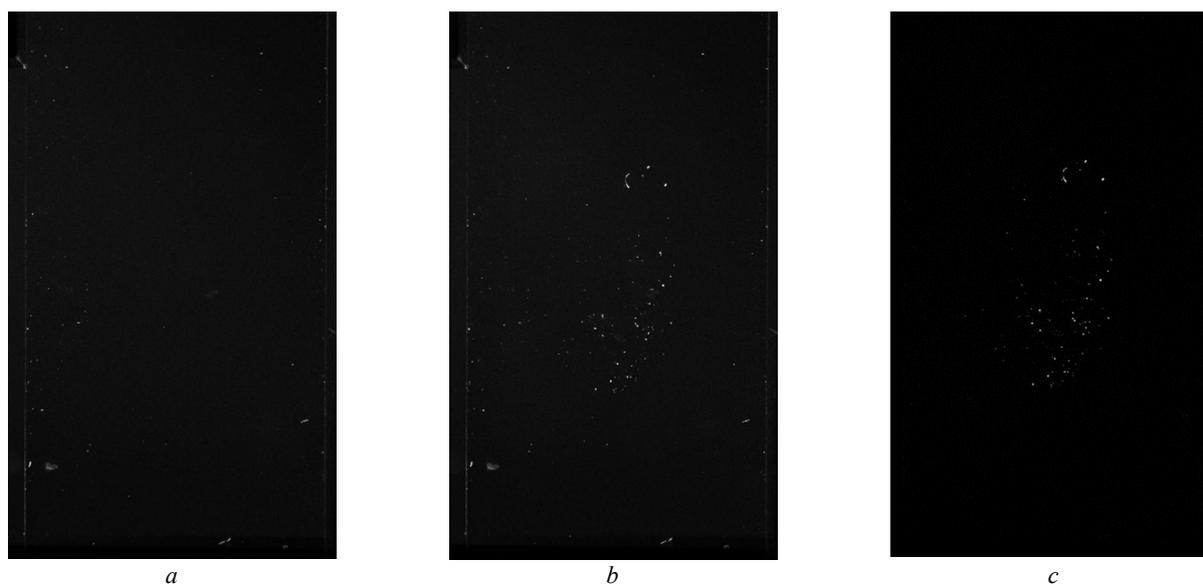


Рис. 3. Цифровые изображения: *a* – «чистое» предметное стекло до нанесения отпечатка пальца; *b* – то же предметное стекло с 50-м отпечатком пальца со следами RDX; *c* – разностное изображение

Fig. 3. Digital images: *a* – “clean” glass slide before fingerprinting; *b* – the same slide with the 50th fingerprint with traces of RDX; *c* – difference image

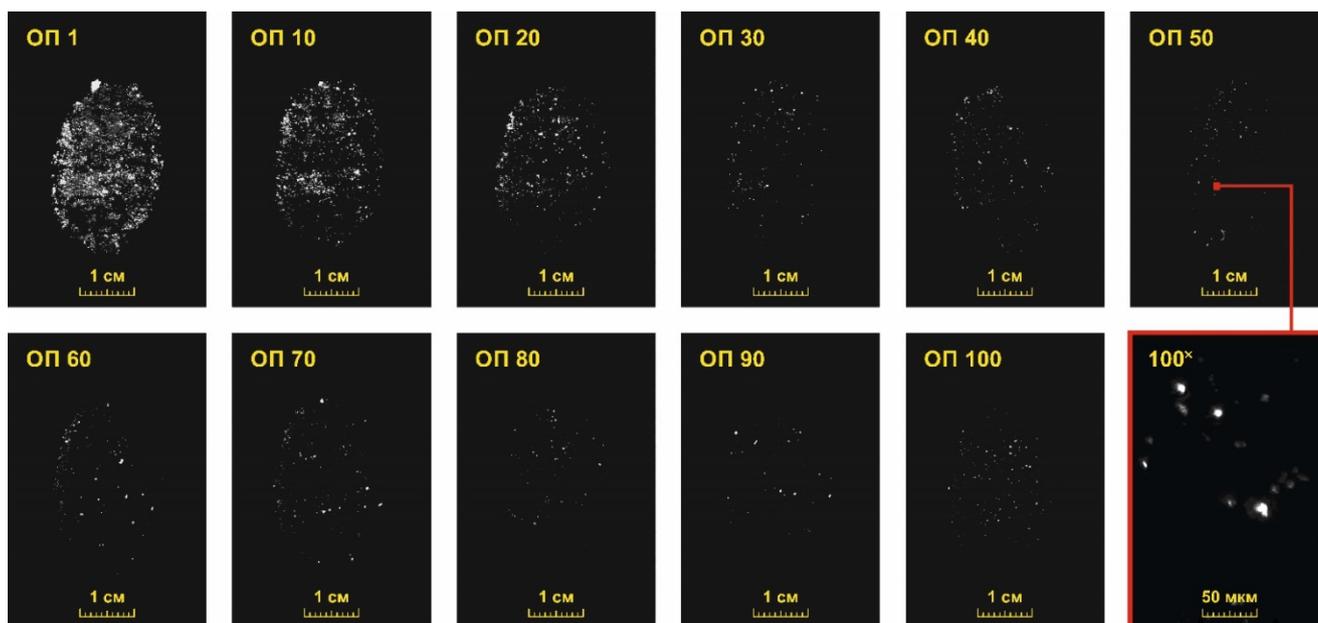


Рис. 4. Разностные изображения потожировых отпечатков пальца с частицами RDX на стеклянной поверхности: ОП – отпечаток пальца; 1, 10, 20, ...100 – порядковый номер отпечатка пальца; 100^x – стократное увеличение фрагмента изображения «ОП 50», полученное с помощью поляризационного микроскопа

Fig. 4. Difference images of fingerprints with RDX microparticles on a glass surface: ОП – fingerprint; 1, 10, 20, ...100 – serial number of the fingerprint; 100^x – a hundredfold increase in the image fragment “ОП 50”, obtained using a polarizing microscope

Как видно из рисунка, площадь следа значительно уменьшается при переходе от 1-го к 100-му отпечатку пальца. Количественный попиксельный анализ макрофотографий показал, что уменьшение площади следа происходит монотонно и для 100-го отпечатка

эта площадь примерно на два порядка меньше исходной (рис. 5).

Анализ макрофотографий следов показывает, что проекции частиц RDX на плоскость подложки имеют разнообразную форму (рис. 6, a–c).

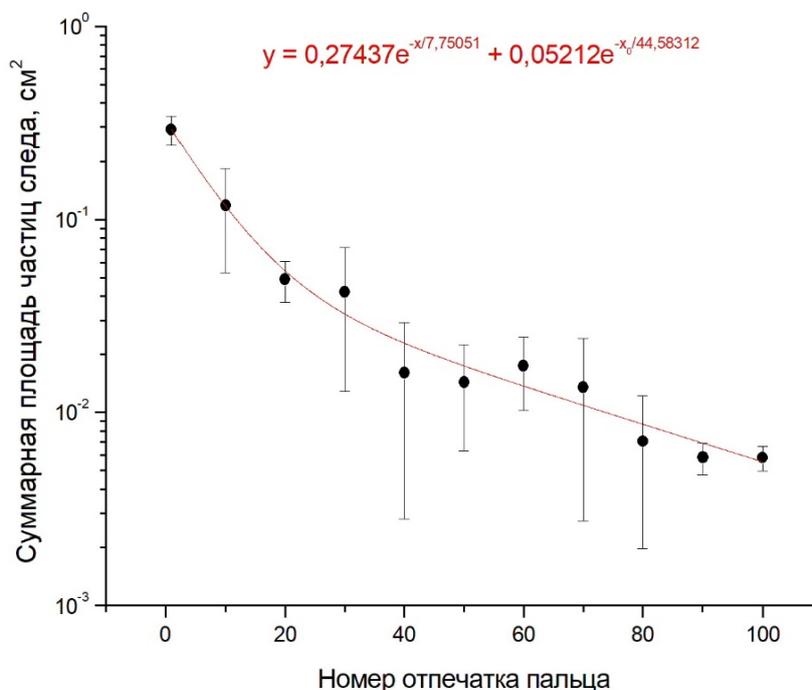


Рис. 5. Зависимость суммарной площади частиц следа от порядкового номера отпечатка пальца

Fig. 5. Dependence of the total area of trace particles on the serial number of the fingerprint

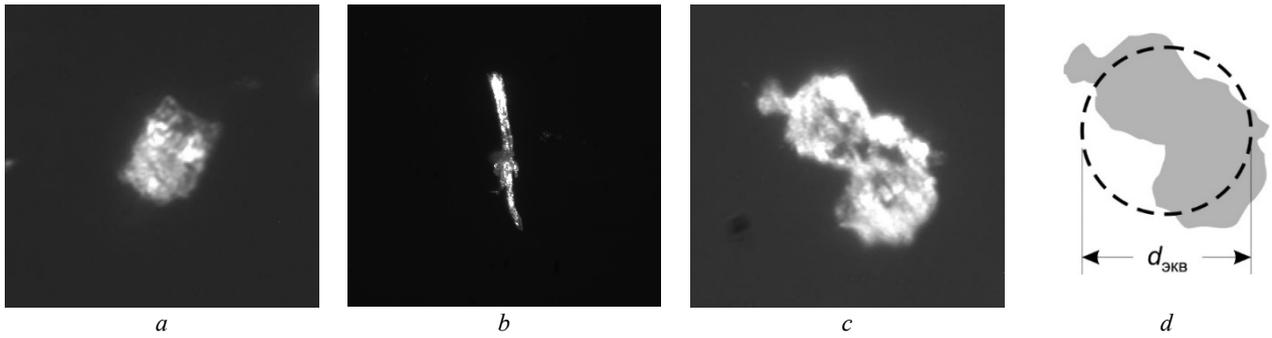


Рис. 6. Морфология частиц RDX

Fig. 6. Morphology of RDX particles

В этом случае мы имеем дело с плоскими фигурами, размер которых может быть охарактеризован с помощью некоторых эквивалентных параметров. Это могут быть максимальный и минимальный диаметр (линейный размер), диаметры Ферета и Мартина и т.д., каждый из которых определяет эффективный размер частицы.

Для определения эффективного объема частиц можно использовать аппроксимацию, предполагающую замену реальных частиц эквивалентными частицами правильной геометрической формы. В [18] для оценки объема V микроскопических частиц RDX в отпечатках пальца предложено использовать выражение

$$V = \frac{1}{6} \pi d_{\text{экв}}^2 h,$$

где $d_{\text{экв}}$ – поверхностно-эквивалентный диаметр – диаметр окружности, площадь которой равна площади поверхностной проекции исходной частицы (рис. 6, d); $h \approx 0,31d_{\text{экв}}$ – толщина частицы.

Таким образом, зная объем частиц и плотность RDX ($1,858 \text{ г/см}^3$), можно оценить общую массу ВВ в отпечатках пальца. Результат подобных вычислений представлен на рис. 7.

Как видно из рисунка, масса перенесенного ВВ при первом касании составляет ~ 3 мг и уменьшается до ~ 30 мкг в сотом отпечатке пальца.

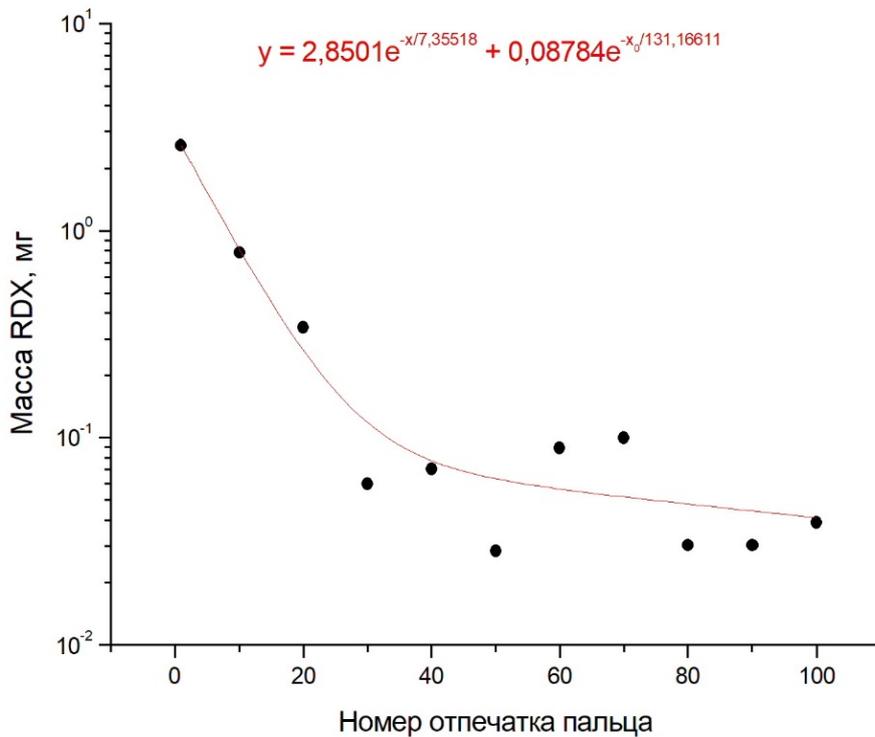


Рис. 7. Зависимость массы RDX от порядкового номера отпечатка пальца

Fig. 7. Dependence of the RDX mass on the serial number of the fingerprint

Дистанционное обнаружение следов ВВ в отпечатках пальца методом ЛФ / ЛИФ

Блок-схема установки для экспериментальных исследований представлена на рис. 8.

Для фрагментации молекул RDX и возбуждения флуоресценции их NO-фрагментов использовался перестраиваемый KrF-лазер с узкой линией генерации ~ 5 пм в области расположения канта ветви P_{12} полосы поглощения $A^2\Sigma^+ (v' = 0) - X^2\Pi (v'' = 2)$ молекулы NO (247,867 нм) [19].

С помощью поворотных зеркал 31 и 32 выходной пучок лазера направлялся в область обнаружения. Для обеспечения необходимой плотности энергии лазерного излучения на поверхности объекта использовалась двухлинзовая система Л1–Л2. Синхронный запуск лазера и системы фотодетектирования

осуществлялся с помощью генератора импульсов ГИ, управляемого от компьютера ПК.

Под действием излучения лазера от поверхности объекта возникал оптический отклик, который частично собирался приемной оптической системой двойного дифракционного спектрометра на вогнутых голографических решетках. Спектрометр осуществлял спектральное выделение $\gamma(0, 0)$ -полосы флуоресценции NO-фрагментов нитросоединений в диапазоне длин волн 222–227 нм с пропусканием $\sim 25\%$ и уровне подавления линии несмещенного рассеяния 10^{-12} . Для регистрации выделенного участка спектра использовалась стробируемая ПЗС-камера с усилителем яркости (Andor iStar DH-712).

Эксперименты проводились по схеме, представленной на рис. 8.

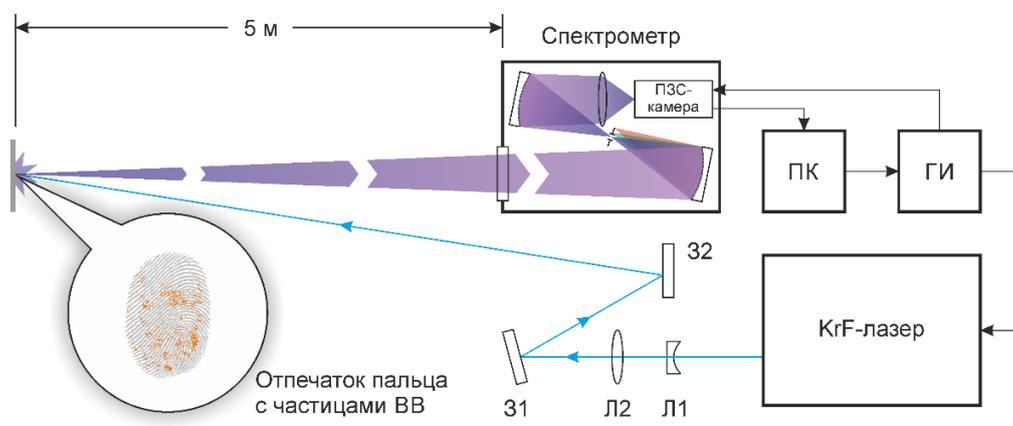


Рис. 8. Блок-схема установки для дистанционного обнаружения следов RDX в отпечатках пальца на стеклянной поверхности: 31 и 32 – направляющие зеркала; Л1 и Л2 – линзы; ГИ – генератор импульсов; ПК – персональный компьютер

Fig. 8. Block diagram of a setup for remote detection of RDX traces in fingerprints on a glass surface
31 and 32 – guiding mirrors; L1 and L2 – lenses; ГИ – pulse generator; ПК – personal computer

В зоне обнаружения на расстоянии 5 м от макета дистанционного обнаружителя следов ВВ устанавливался объект с закрепленным на его поверхности образцом со следами RDX. Далее производилось импульсное лазерное воздействие на поверхность образца с последующей регистрацией оптического отклика от него. Регистрация оптического отклика велась в режиме счета фотонов. При объеме накопления сигнала по 50 лазерным импульсам и частоте следования лазерных импульсов 20 Гц время одного измерения составляло 2,5 с. Все измерения проводились в лабораторном помещении при температуре 23 °С. Плотность энергии в лазерном импульсе составляла ~ 30 мДж/см².

Результаты экспериментов

Результаты экспериментов по обнаружению следовых количеств RDX в отпечатках пальцев на предметном стекле представлены в таблице. Разработанный экспериментальный макет аппаратуры

достоверно регистрировал отклик на наличие RDX в сотом отпечатке пальца.

Результаты экспериментов по обнаружению следов RDX в отпечатках пальцев на предметном стекле

Порядковый номер отпечатка пальца	Среднее число фотоотсчетов отклика от поверхности образца со следами ВВ ($\bar{n}_s + \bar{n}_n$)	Среднее число шумовых фотоотсчетов отклика (от чистой поверхности образца) \bar{n}_n	Отношение сигнал/шум \bar{n}_s / \bar{n}_n
1	138	1	137
10	36	1	35
20	17	1	16
30	13	1	12
40	11	1	10
50	14	1	13
60	15	1	14
70	4	1	3
80	4	1	3
90	6	1	5
100	3	1	2

Интенсивность ЛИФ NO-фрагментов RDX, нормированная на интенсивность от первого отпечатка пальца, представлена на рис. 9. Здесь же для сравнения приведена нормированная зависимость площади следа от порядкового номера отпечатка пальца (см. рис. 5).

Видно, что обе зависимости хорошо согласуются между собой. Вероятно, это связано с тем, что излучение с длиной волны ~ 248 слабо проникает в объем частиц RDX (глубина проникновения импульса излучения составляет ~ 55 нм). Для серии из 50-лазерных импульсов слой вещества, проваимодействовавший

с излучением, составит не более 3 мкм. Распределение частиц RDX по параметру h в приготовленных образцах (рис. 10) показывает, что доля частиц с $h \leq 10$ мкм составляет около 9% от общего числа частиц. Таким образом, при оценке эффективности использования ЛФ / ЛИФ-метода определяющее значение будет иметь площадь следа, а не масса вещества в нем. С учетом этой особенности очевидно, что чувствительность метода в терминах поверхностной концентрации ($\text{мкг}/\text{см}^2$) будет зависеть от структуры следа.

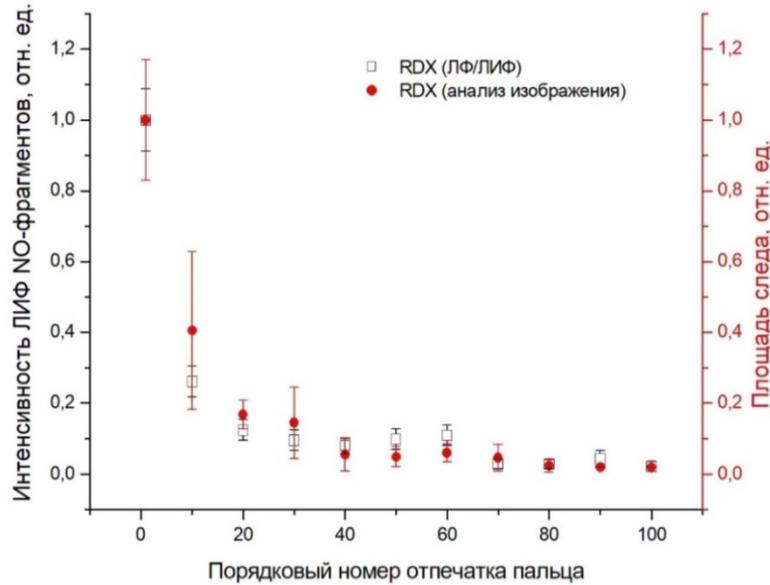


Рис. 9. Нормированные зависимости интенсивности ЛИФ и площади следа от порядкового номера отпечатка пальца

Fig. 9. Normalized dependences of LIF intensity and trace area on the serial number of the fingerprint

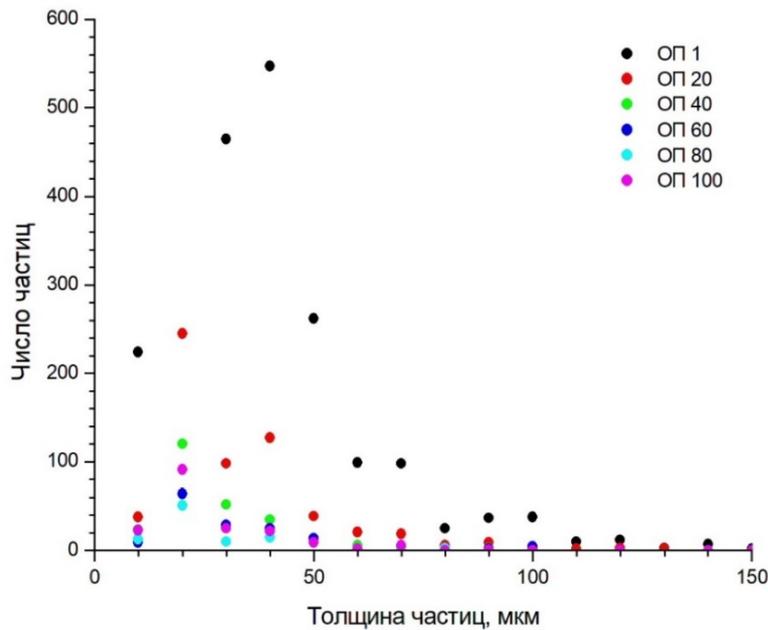


Рис. 10. Распределение частиц RDX по параметру h

Fig. 10. Distribution of RDX particles by parameter h

Заключение

Таким образом, применение метода макрофотографии высокого разрешения в поляризованном свете позволило исследовать эволюцию процесса переноса микрочастиц RDX в потожировых отпечатках пальцев от 1-го до 100-го. При этом сила давления при каждом акте переноса отпечатка контролировалась и составляла 2 Н. Такой подход позволил стабилизировать процесс переноса отпечатка и повысить повторяемость результата.

Попиксельный анализ макрофотографий следа позволил осуществить количественную оценку эволюции суммарной площади проекции контура частиц на плоскость подложки и в рамках модели при-

плюснутых сфероидов определить массу следа в каждом отпечатке. Результаты экспериментов позволили построить зависимость массы следа от номера отпечатка. Анализ зависимости показывает, что уменьшение массы вещества следа при переносе происходит по экспоненциальному закону вплоть до 40-го отпечатка, а затем процесс переноса существенно замедляется и, возможно, входит в насыщение. Это явление подтверждает гипотезу высокой сохранности следа в отпечатке пальцев и требует дополнительного исследования.

Сопоставление данных прямых измерений суммарной площади следа с данными откликов лидарного обнаружителя ЛФ / ЛИФ дает хорошее согласие.

Список источников

1. *Rodgers M.O., Davis D.D.* A UV-Photofragmentation/Laser-Induced Fluorescence Sensor for the Atmospheric Detection of HONO // *Environmental science & technology*. 1989. V. 23 (9). P. 1106–1112. DOI: 10.1021/es00067a007
2. *Galloway D.B., Bartz J.A., Huey L.G., Crim F.F.* Pathways and kinetic energy disposal in the photodissociation of nitrobenzene // *The Journal of chemical physics*. 1993. V. 98 (3). P. 2107–2114. DOI: 10.1063/1.464188
3. *Lemire G.W., Simeonsson J.B., Sausa R.C.* Monitoring of vapor-phase nitro compounds using 226-nm radiation: fragmentation with subsequent NO resonance-enhanced multiphoton ionization detection // *Analytical Chemistry*. 1993. V. 65 (5). P. 529–533. DOI: 10.1021/AC00053A008
4. *Galloway D.B., Glenewinkel-Meyer T., Bartz J.A., Huey L.G., Crim F.F.* The Kinetic and Internal Energy of NO from the Photodissociation of Nitrobenzene // *The Journal of chemical physics*. 1994. V. 100 (3). P. 1946–1952. DOI: 10.1063/1.466547
5. *Wu D.D., Singh J.P., Yueh F.Y., Monts D.L.* 2,4,6-Trinitrotoluene detection by laser-photofragmentation–laser-induced fluorescence // *Applied Optics*. 1996. V. 35 (21). P. 3998–4003. DOI: 10.1364/AO.35.003998
6. *Simeonsson J.B., Sausa R.C.* A critical review of laser photofragmentation/fragment detection techniques for gas phase chemical analysis // *Applied Spectroscopy Reviews*. 1996. V. 31 (1). P. 1–72. DOI: 10.1080/05704929608000564
7. *Swayambunathan V., Singh G., Sausa R.C.* Laser photofragmentation–fragment detection and pyrolysis–laser-induced fluorescence studies on energetic materials // *Applied optics*. 1999. V. 38 (30). P. 6447–6454. DOI: 10.1364/AO.38.006447
8. *Daughey N., Shu J., Bar I., Rosenwaks S.* Nitrobenzene detection by one-color laser photolysis/laser induced fluorescence of NO ($v = 0-3$) // *Applied spectroscopy*. 1999. V. 53 (1). P. 57–64. DOI: 10.1366/0003702991945227
9. *Shu J., Bar I., Rosenwaks S.* Dinitrobenzene Detection by Use of One-color Laser Photolysis and Laser-Induced Fluorescence of Vibrationally Excited NO // *Applied optics*. 1999. V. 38 (21). P. 4705–4710. DOI: 10.1364/AO.38.004705
10. *Shu J., Bar I., Rosenwaks S.* NO and PO photofragments as trace analyte indicators of nitrocompounds and organophosphonates // *Applied Physics B*. 2000. V. 71 (5). P. 665–672. DOI: 10.1007/S003400000382
11. *Shu J., Bar I., Rosenwaks S.* The use of rovibrationally excited NO photofragments as trace nitrocompounds indicators // *Applied Physics B*. 2000. V. 70(4). P. 621–625. DOI: 10.1007/S003400050870
12. *Arusi-Parpar T., Heflinger D., Lavi R.* Photodissociation Followed by Laser-Induced Fluorescence at Atmospheric Pressure and 24°C: A Unique Scheme for Remote Detection of Explosives // *Applied optics*. 2001. V. 40 (36). P. 6677–6681. DOI: 10.1364/AO.40.006677
13. *Heflinger D., Arusi-Parpar T., Ron Y., Lavi R.* Application of a unique scheme for remote detection of explosives // *Optics Communications*. 2002. V. 204 (1–6). P. 327–331. DOI: 10.1016/S0030-4018(02)01250-6
14. *Wynn C.M., Palmacci S., Kunz R.R., Rothschild M.* Noncontact detection of homemade explosive constituents via photodissociation followed by laser-induced fluorescence // *Optics express*. 2010. V. 18 (6). P. 5399–5406. DOI: 10.1364/OE.18.005399
15. *Wynn C.M., Palmacci S., Kunz R.R., Aernecke M.* Noncontact optical detection of explosive particles via photodissociation followed by laser-induced fluorescence // *Optics express*. 2011. V. 19 (19). P. 18671–18677. DOI: 10.1364/OE.19.018671
16. *Bobrovnikov S.M., Gorlov E.V.* Lidar method for remote detection of vapors of explosives in the atmosphere // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2011. V. 24 (3). P. 235–241. DOI: 10.1134/S1024856011030055
17. *Bobrovnikov S.M., Vorozhtsov A.B., Gorlov E.V., Zharkov V.I., Maksimov E.M., Panchenko Y.N., Sakovich G.V.* Lidar detection of explosive vapors in the atmosphere // *Russian Physics Journal*. 2016. V. 58(9). P. 1217–1225. DOI: 10.1007/s11182-016-0635-9
18. *Verkouteren J.R., Coleman J.L., Cho I.* Automated Mapping of Explosives Particles in Composition C-4 Fingerprints // *Journal of Forensic Sciences*. 2010. V. 55(2). P. 334–340. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2009.01272.x
19. *Panchenko Y., Puchikin A., Yampolskaya S., Bobrovnikov S., Gorlov E., Zharkov V.* Narrowband KrF Laser for Lidar Systems // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 2021. V. 57 (2). P. 1–5. DOI: 10.1109/JQE.2021.3049579

References

1. Rodgers, M.O. & Davis, D.D. (1989) A UV-Photofragmentation/Laser-Induced Fluorescence Sensor for the Atmospheric Detection of HONO. *Environmental science & technology*. 23(9). pp. 1106–1112. DOI: 10.1021/es00067a007
2. Galloway, D.B., Bartz, J.A., Huey, L.G. & Crim, F.F. (1993) Pathways and kinetic energy disposal in the photodissociation of nitrobenzene. *The Journal of chemical physics*. 98(3). pp. 2107–2114. DOI: 10.1063/1.464188

- Lemire, G.W., Simeonsson, J.B. & Sausa, R.C. (1993) Monitoring of vapor-phase nitro compounds using 226-nm radiation: fragmentation with subsequent NO resonance-enhanced multiphoton ionization detection. *Analytical Chemistry*. 65(5). pp. 529–533. DOI: 10.1021/AC00053A008
- Galloway, D.B., Glenwinkel-Meyer, T., Bartz, J.A., Huey, L.G. & Crim, F.F. (1994) The Kinetic and Internal Energy of NO from the Photodissociation of Nitrobenzene. *The Journal of chemical physics*. 100(3). pp. 1946–1952. DOI: 10.1063/1.466547
- Wu, D.D., Singh, J.P., Yueh, F.Y. & Monts, D.L. (1996) 2,4,6-Trinitrotoluene detection by laser-photofragmentation–laser-induced fluorescence. *Applied Optics*. 35(21). pp. 3998–4003. DOI: 10.1364/AO.35.003998
- Simeonsson, J.B. & Sausa, R.C. (1996) A critical review of laser photofragmentation/fragment detection techniques for gas phase chemical analysis. *Applied Spectroscopy Reviews*. 31(1). pp. 1–72. DOI: 10.1080/05704929608000564
- Swayambunathan, V., Singh, G. & Sausa, R.C. (1999) Laser photofragmentation–fragment detection and pyrolysis–laser-induced fluorescence studies on energetic materials. *Applied optics*. 38(30). pp. 6447–6454. DOI: 10.1364/AO.38.006447
- Daugey, N., Shu, J., Bar, I. & Rosenwaks, S. (1999) Nitrobenzene detection by one-color laser photolysis/laser induced fluorescence of NO ($v = 0-3$). *Applied spectroscopy*. 53(1). pp. 57–64. DOI: 10.1366/0003702991945227
- Shu, J., Bar, I. & Rosenwaks, S. (1999) Dinitrobenzene Detection by Use of One-color Laser Photolysis and Laser-Induced Fluorescence of Vibrationally Excited NO. *Applied optics*. 38(21). pp. 4705–4710. DOI: 10.1364/AO.38.004705
- Shu, J., Bar, I. & Rosenwaks, S. (2000) NO and PO photofragments as trace analyte indicators of nitrocompounds and organophosphonates. *Applied Physics B*. 71(5). pp. 665–672. DOI: 10.1007/S003400000382
- Shu, J., Bar, I. & Rosenwaks, S. (2000) The use of rovibrationally excited NO photofragments as trace nitrocompounds indicators. *Applied Physics B*. 70(4). pp. 621–625. DOI: 10.1007/S003400050870
- Arusi-Parpar, T., Heflinger, D. & Lavi, R. (2001) Photodissociation Followed by Laser-Induced Fluorescence at Atmospheric Pressure and 24°C: A Unique Scheme for Remote Detection of Explosives. *Applied optics*. 40(36). pp. 6677–6681. DOI: 10.1364/AO.40.006677
- Heflinger, D., Arusi-Parpar, T., Ron, Y. & Lavi, R. (2002) Application of a unique scheme for remote detection of explosives. *Optics Communications*. 204(1–6). pp. 327–331. DOI:10.1016/S0030-4018(02)01250-6
- Wynn, C.M., Palmacci, S., Kunz, R.R. & Rothschild, M. (2010) Noncontact detection of homemade explosive constituents via photodissociation followed by laser-induced fluorescence. *Optics express*. 18(6). pp. 5399–5406. DOI: 10.1364/OE.18.005399
- Wynn, C.M., Palmacci, S., Kunz, R.R. & Aernecke, M. (2011) Noncontact optical detection of explosive particles via photodissociation followed by laser-induced fluorescence. *Optics express*. 19(19). pp. 18671–18677. DOI: 10.1364/OE.19.018671
- Bobrovnikov, S.M. & Gorlov, E.V. (2011) Lidar method for remote detection of vapors of explosives in the atmosphere. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 24(3). pp. 235–241. DOI: 10.1134/S1024856011030055
- Bobrovnikov, S.M., Vorozhtsov, A.B., Gorlov, E.V., Zharkov, V.I., Maksimov, E.M., Panchenko, Y.N. & Sakovich, G.V. (2016) Lidar detection of explosive vapors in the atmosphere. *Russian Physics Journal*. 58(9). pp. 1217–1225. DOI: 10.1007/s11182-016-0635-9
- Verkouteren, J.R., Coleman, J.L. & Cho, I. (2010) Automated Mapping of Explosives Particles in Composition C-4 Fingerprints. *Journal of Forensic Sciences*. 55(2). pp. 334–340. DOI: 10.1111/j.1556-4029.2009.01272.x
- Panchenko, Y., Puchikin, A., Yampolskaya, S., Bobrovnikov, S., Gorlov, E. & Zharkov, V. (2021) Narrowband KrF Laser for Lidar Systems. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 57(2). pp. 1–5. DOI: 10.1109/JQE.2021.3049579

Информация об авторах:

Бобровников Сергей Михайлович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); заведующий Центром лазерного зондирования атмосферы Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: bsm@iao.ru

Горлов Евгений Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптико-электронных систем и дистанционного зондирования Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: gorlov_e@mail.ru

Жарков Виктор Иванович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: zharkov@iao.ru

Мурашко Сергей Николаевич – инженер научно-исследовательской лаборатории лазерного зондирования Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); инженер Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: msn_17@mail.ru

Панченко Юрий Николаевич – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории квантовых информационных технологий Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия); заведующий лабораторией газовых лазеров Института сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук (Томск, Россия). E-mail: yu.n.panchenko@mail.ru

Аксёнов Валерий Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Сибирского филиала Федерального казенного учреждения Научно-производственное объединение «Специальная техника и связь» МВД России (Новосибирск, Россия). E-mail: duploduba@mail.ru

Кихтенко Андрей Владимирович – кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории полевых аналитических и измерительных технологий Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (Новосибирск, Россия). E-mail: kikht@mail.ru

Тивилёва Мария Ильинична – заместитель начальника Сибирского филиала Федерального казенного учреждения Научно-производственное объединение «Специальная техника и связь» МВД России (Новосибирск, Россия). E-mail: mtivileva@yandex.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Bobrovnikov Sergei M., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); head of Center of Laser Atmosphere Sensing, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: bsm@iao.ru

Gorlov Evgeny V., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Senior Researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: gorlov_e@mail.ru

Zharkov Viktor I., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: zharkov@iao.ru

Murashko Sergei N., engineer, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); Engineer, V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: msn_17@mail.ru

Panchenko Yury N., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation); head of Laboratory of Gas Lasers, Institute of High Current Electronics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: yu.n.panchenko@mail.ru

Aksenov Valery A., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), associate professor, leading researcher of the Siberian branch of the Federal State Institution Scientific and Production Association "Special Equipment and Communications" of the Ministry of Internal Affairs of Russian Federation (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: duploduba@mail.ru

Kikhtenko Andrey V., Cand.Sc. (Chemistry), researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: kikht@mail.ru

Tivileva Maria I., deputy head of the Siberian Branch of the Federal State Institution Scientific and Production Association "Special Equipment and Communications" of the Ministry of Internal Affairs of Russian Federation (Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: mtivileva@yandex.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023

Научная статья
УДК 544.7
doi: 10.17223/7783494/1/4

Синтез гранулированного сорбента на основе цеолита LSX для получения кислорода из воздуха

Анна Сергеевна Савельева¹, Григорий Владимирович Мамонтов²

^{1,2} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *blokhina_as@mail.ru*

² *grigoriymamontov@mail.ru*

Аннотация. Рассмотрен синтез гранулированного сорбента на основе цеолита LSX. Цеолит LSX относится к низкокремниевым цеолитам типа фожазита с соотношением Si:Al = 1–1,2. Кристаллическая структура цеолитов образована из тетраэдров SiO₄ и AlO₄, связанных между собой. Содержание алюминия в каркасе цеолита определяет количество внекаркасных катионов, компенсирующих избыточный отрицательный заряд алюминия. Природа внекаркасного катиона определяет сорбционные свойства цеолита LSX. Так, для разделения компонентов воздуха и получения кислорода применяют Ca²⁺, Li⁺, Ag⁺ замещенные цеолиты. Отдельной задачей стоит формирование цеолита в виде гранул и шариков с применением связующего без потери адсорбционной емкости цеолита. В качестве связующего чаще всего выступают доступные природные материалы (каолин, бентонит, метакаолин). В настоящей работе гранулы сорбента получали путем формирования кристаллического LSX с метакаолином в соотношении 1:1 и последующей гидротермальной обработкой в щелочном растворе при 50 °С в течение 14 сут. Методом низкотемпературной адсорбции азота установлено, что с увеличением времени гидротермальной обработки увеличивается удельная поверхность гранул цеолита и практически достигает значения удельной поверхности исходного порошкового цеолита LSX. Методом рентгенофазового анализа показано, что в ходе гидротермальной обработки растет степень кристалличности в грануле, что свидетельствует о растворении метакаолина и формировании новой кристаллической структуры LSX на первичных кристаллах цеолита. Таким образом, показано, что данный метод синтеза позволяет увеличить удельную площадь поверхности и содержание кристаллического LSX относительно исходных гранул за счет растворения метакаолина и кристаллизации его в структуру LSX. Полученные гранулы будут использованы как основа для адсорбента при получении кислорода из воздуха.

Ключевые слова: цеолит, LSX, формирование, гранула, разделение воздуха, кислород

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Савельева А.С., Мамонтов Г.В. Синтез гранулированного сорбента на основе цеолита LSX для получения кислорода из воздуха // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 19–23. doi: 10.17223/7783494/1/4

Original article
doi: 10.17223/7783494/1/4

Synthesis of granular sorbent based on zeolite LSX for obtaining oxygen from air

Anna S. Savel'eva¹, Grigory V. Mamontov²

^{1,2} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *blokhina_as@mail.ru*

² *grigoriymamontov@mail.ru*

Abstract. The paper considers the synthesis of a granular sorbent based on LSX zeolite. Zeolite LSX refers to low-silica faujasite-type zeolites with Si:Al ratio = 1-1.2. The crystal structure of zeolites is formed from SiO₄ and AlO₄ tetrahedra connected to each other. The aluminum content in the zeolite framework determines the amount of extraframework cations compensating for the excess negative aluminum charge. The nature of the extraframework cation determines the sorption properties of LSX zeolite. Thus, Ca²⁺, Li⁺, Ag⁺ substituted zeolites are used to separate air components and produce oxygen. A separate task is the formation of zeolite in the form of granules and balls using a binder without losing the adsorption capacity of the zeolite. Available natural materials (kaolin, bentonite, metakaolin) most often act as a binder. In this research, sorbent granules were obtained by molding crystalline LSX with metakaolin in a ratio of 1:1 and subsequent hydrothermal treatment in an alkaline solution at 50 °C for 14 days. Using the low-temperature nitrogen adsorption method, it was found that with an increase in the time of hydrothermal treatment, the specific surface area of zeolite granules increases and practically reaches the value of the specific surface area of the initial LSX powder zeolite. X-ray phase analysis showed that the degree of crystallinity in the granule increases during hydrothermal treatment, which indicates the dissolution of metakaolin and the formation of a new LSX crystal structure on primary zeolite crystals. Thus, it has been shown that this synthesis method makes it possible to increase the specific surface area and the content of crystalline LSX relative to the initial granules due to the dissolution of metakaolin and its crystallization into the LSX structure. The resulting granules will be used as the basis for an adsorbent to obtain oxygen from the air.

Keywords: zeolite, LSX, extrusion, pellet, air separation, oxygen

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Savel'eva, A.S. & Mamontov, G.V. (2023) Synthesis of granular sorbent based on zeolite LSX for obtaining oxygen from air. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 19–23. doi: 10.17223/7783494/1/4 (In Russian).

Введение

Чистый кислород используется во многих областях промышленности, применяется для хозяйственных и медицинских целей. Обеспечение кислородом подводных лодок, самолетов, космической станции является одной из задач безопасности жизнедеятельности человека.

В небольших объемах кислород получают разложением химических соединений, таких как хлорат натрия (NaClO_3), пероксид водорода (H_2O_2); электролизом воды. В промышленных объемах кислород получают разделением воздуха с помощью различных технологий [1]. Выделяют три основные технологии получения кислорода: криогенное разделение (конденсация), основанное на разной температуре конденсации азота, кислорода и других компонентов; мембранная технология разделения, основанная на возможности пропускания через мембрану молекулы определенного размера (молекулярно-ситовой эффект); адсорбционный способ получения кислорода с применением низкомолекулярных цеолитов LSX.

В настоящий момент в адсорбционных установках получения кислорода используются адсорбенты на основе низкомолекулярного цеолита LSX, в структуре которого распределены катионы щелочных и /или щелочноземельных металлов [2]. Установки работают по принципу короткоциклового адсорбции и состоят из двух адсорберов, заполненных сорбентом на основе LSX [3]. Пока в первом адсорбере происходит адсорбция молекул азота на внекаркасных катионах металлов и выход чистого кислорода, второй адсорбер находится в режиме регенерации, затем наоборот. Установки короткоциклового адсорбции в различных вариантах являются распространенным и доступным оборудованием для получения кислорода из воздуха. Обеспечение установок гранулированным адсорбентом на основе цеолита LSX является стратегической задачей в связи с использованием таких установок на предприятиях оборонного комплекса, в военной и гражданской авиации.

Традиционным способом формирования гранул адсорбентов является смешение целевых порошков со связующим (каолин, бентонит и т.п.) и последующая экструзия [4]. При этом адсорбент на этапе формирования может потерять до 20% своей сорбционной ёмкости, поскольку связующее никак не участвует в процессе адсорбции. Существуют способы формирования

гранул цеолитов со связующим-предшественником цеолита, который в процессе гидротермальной обработки растворяется и затем кристаллизуется в виде цеолита на уже сформированных кристаллических зернах. Так, описан и промышленно реализован способ получения адсорбента NaX-БС. В настоящее время нет данных об использовании метода кристаллизации в грануле цеолита LSX. В качестве связующего и предшественника LSX целесообразно рассмотреть природный кристаллический алюмосиликат – каолин и метакаолин [5], поскольку соотношения Si/Al в метакаолине и низкомолекулярном цеолите LSX близки.

Целью нашей работы было изучить возможность формирования кристаллической структуры цеолита LSX внутри гранулы путем перекристаллизации связующего – метакаолина в структуру LSX в мягких условиях гидротермальной обработки при обязательном условии сохранения гранулы.

Экспериментальная часть

Для формирования гранул был выбран порошок NaKLSX производства «Росхимзащита» с удельной площадью поверхности ($S_{уд}$) 434 м²/г. В качестве связующего использовали порошок промышленного высокоактивного метакаолина ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$).

Порошковые цеолит NaKLSX и метакаолин смешивали в соотношении 1:1, затем тщательно перемешивали до однородности в керамической чашке. Затем по каплям добавляли предварительно подготовленный раствор алюмината натрия. При достижении оптимальной влажности пасты проводили экструзию с помощью лабораторного шприца с фильтровой диаметром 2 мм. Экструдаты сушили на воздухе при комнатной температуре, затем при 100 °С. После сушки экструдаты измельчали до гранул длиной 3–4 мм, после чего прокаливали в муфельной печи при 500 °С, образец обозначен LSX+m_0.

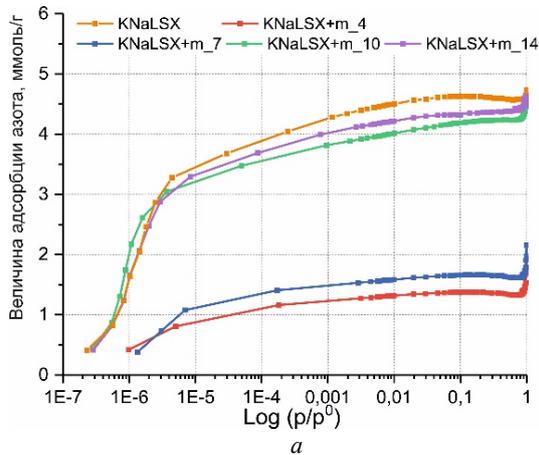
Гранулы образца LSX+m_0 поместили в тefлоновый автоклав, залили концентрированным раствором смеси щелочей NaOH и KOH и подвергали гидротермальной обработке (ГТО) при 50 °С в течение 14 сут. Образцы гранул цеолита отбирали через 4, 7, 10 сут (образцы LSX+m_4; LSX+m_7 и LSX+m_10 соответственно), через 14 сут образец LSX+m_14 выгрузили из реакционного сосуда. Дополнительно исследовали образец гранул LSX+m_14(90) с повышением температуры ГТО до 90 °С.

Удельную поверхность образцов оценивали методом низкотемпературной адсорбции азота на анализаторе 3Flex (Micromeritics, США) по методу БЭТ. Предварительно все образцы дополнительно измельчали, дегазировали под вакуумом при 350 °С в течение 4 ч. Распределение пор по размерам рассчитывали по методу Ховарта–Кавазое. Фазовый состав образцов исследовали методом на дифрактометре XRD-6000 (Shimadzu, Япония) с монохроматическим $\text{CuK}\alpha$ -излучением (1,54 Å) в диапазоне 2θ 5 – 80° и скорости сканирования 0,02 °/с. Данные были собраны с использованием геометрии Брэгга-Брентано. Фазовый состав анализировали с использованием базы данных PDF-2 (Release 2012 RDB) и Атласа цеолитов [6]. Степень кристалличности образцов гранулированного цеолита оценивали по интенсивностям основных рефлексов (6,1; 15,4; 23,36; 26,73; 30,12°), отнесенных к интенсивности тех же рефлексов гранул по формуле [7]

$$X = \frac{\sum I_{\text{прод}}}{\sum I_{\text{сравн}}} 100\%,$$

где $\sum I_{\text{прод}}$ – сумма интенсивностей рефлексов исследуемых гранул; $\sum I_{\text{сравн}}$ – сумма интенсивностей основных рефлексов образца LSX+m_14.

Для более подробного анализа процесса кристаллизации цеолита внутри гранулы оценили относительный прирост степени кристалличности образцов по формуле



$$W = \frac{X_{\text{образца}} - X_{\text{LSX+m-0}}}{X_{\text{LSX+m-0}}} 100\%,$$

где $X_{\text{LSX+m-0}}$ – степень кристалличности исходной гранулы.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены изотермы адсорбции азота на цеолите NaKLSX и сформованных гранулах. Все изотермы характеризуются резким ростом количества адсорбированного азота в области низких относительных давлений и практически полным совпадением адсорбционной и десорбционной ветвей изотермы. Согласно классификации ИЮПАК [8], такие изотермы описывают адсорбцию в микропористых материалах и соответствуют I типу. Распределение микропор по размерам было рассчитано по методу Ховарта–Кавазое (ХК). Показано, что максимум распределения микропор по размерам для всех образцов цеолитов составляет 0,53–0,55 нм, что характерно для цеолитов, кристаллизующихся в форме фожазита, в том числе и LSX.

Из рис. 1 видно, что увеличение времени гидротермальной обработки гранул приводит к росту количества поглощенного азота, что говорит о структурных перестройках, происходящих внутри гранул, увеличении количества микропор. Рассчитанная по методу БЭТ удельная площадь поверхности приведена в таблице.

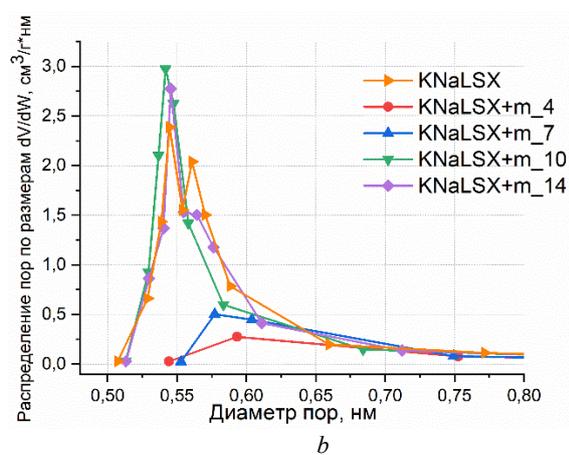


Рис. 1. Изотермы адсорбции азота в логарифмических координатах (a) и распределение пор по размерам по методу Ховарта–Кавазое (b) для серии образцов LSX+m при различном времени гидротермальной обработки

Fig. 1. Nitrogen adsorption isotherms (a) and pore size distribution according to the Howarth-Cavazoe method (b) for a series of LSX+m samples at different hydrothermal treatment times

Текстурные и структурные характеристики гранулированных образцов цеолита LSX

Образец	$S_{\text{БЭТ}}, \text{м}^2/\text{г}$	$X, \%$ *	$W, \%$ **
NaKLSX (порошок)	434	–	–
LSX+m_0	–	58,5	0
LSX+m_4	128	82,2	40,5
LSX+m_7	154	79,1	35,1
LSX+m_10	390	92,4	57,8
LSX+m_14	409	102,1	74,5
LSX+m_14(90)	401	100	70,9

* Расчет степени кристалличности относительно LSX+m_14(90); ** относительный прирост кристалличности относительно LSX+m_0.

Для исходных сформованных гранул LSX+m₀ изотерму адсорбции измерить не удалось, по-видимому, из-за диффузионных затруднений и «запечатывания» пористой структуры алюминатом натрия. Для остальных образцов было установлено, что в первые 7 сут площадь удельной поверхности изменяется незначительно, по-видимому, на данном этапе происходило частичное растворение как исходного цеолита, так и связующего гранулы – метаксаолина. Формирование структуры цеолита внутри гранулы происходило между 7-ми и 10-ми сут, основной вклад в увеличение площади удельной поверхности происходил в этот период: с 154 м²/г для образца LSX+m₇ до 390 м²/г для LSX+m₁₀. Созревание и окончательное формирование структуры цеолита происходило в течение 14 сут, однако вклад в увеличение удельной поверхности с 10-х по 14-е сут ГТО был минимален. Повышение температуры ГТО до 90 °С не привело к изменению удельной поверхности, различия в значениях S_{БЭТ} для образцов LSX+m₁₄ и LSX+m₁₄₍₉₀₎ обусловлены погрешностью метода определения.

На рис. 2 приведены рентгенограммы образцов исходного NaKLSX цеолита, метаксаолина, сформованных гранул (образец LSX+m₀) и образцов, по-

лученных после гидротермальной обработки в щелочном растворе в течение 4, 7, 10, 14-х сут (образцы LSX+m₄; LSX+m₇; LSX+m₁₀; LSX+m₁₄ соответственно). На рентгенограммах видно, что с увеличением времени ГТО интенсивность сигналов фазы KNaLSX возрастает, максимумы сужаются, что говорит о росте кристаллов в грануле. Максимумы при 12,38; 24,86; 26,66°, соответствующие фазе метаксаолина, уменьшаются относительно интенсивности основного рефлекса цеолита при 6,1° или исчезают совсем с увеличением времени ГТО. По данным рентгеновской дифракции была оценена степень кристалличности гранул в зависимости от времени ГТО (величина X в таблице). Степень кристалличности оценивали, принимая за 100% рефлекс рентгенограммы LSX+m₁₄₍₉₀₎. Было установлено, что с увеличением времени ГТО кристалличность образцов увеличивается, что связано с ростом кристаллической фазы цеолита. Также более показательным является параметр W – прирост степени кристалличности относительно исходных гранул LSX+m₀. Показано, что степень кристалличности гранул после 14 дней ГТО увеличилась на 70% относительно исходных гранул.

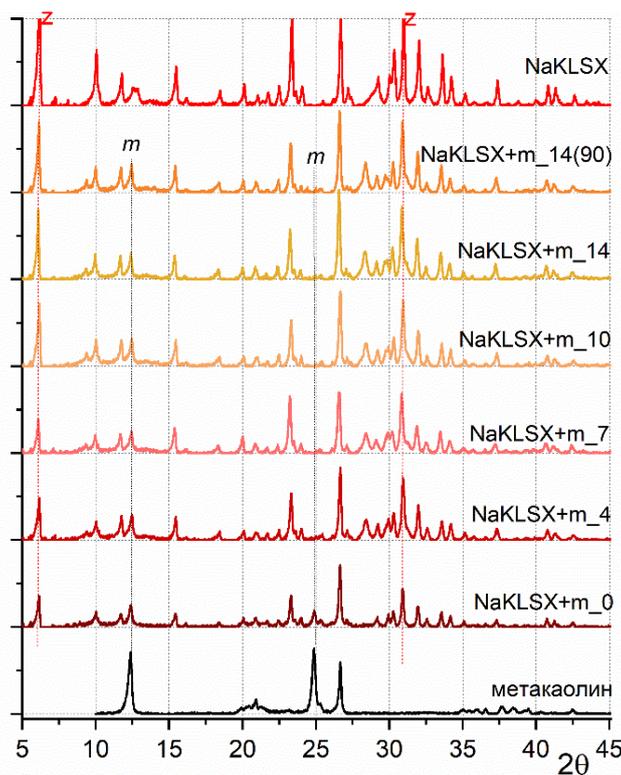


Рис. 2. Рентгенограммы для NaKLSX, метаксаолина и серии образцов LSX+m при различном времени гидротермальной обработки для серии образцов LSX+m при различном времени гидротермальной обработки

Fig. 2. X-ray diffraction patterns for NaKLSX, metakaolin and a series of LSX+m samples at different hydrothermal treatment times for a series of LSX+m samples at different hydrothermal processing times

В работе показано, что формирование цилиндрических гранул из цеолита LSX и метакаолина и последующая гидротермальная обработка при 50 °С в щелочной среде (NaOH+KOH) приводит к формированию LSX внутри гранулы. По данным РФА и низкотемпературной адсорбции азота, при заданной температуре ГТО формирование цеолита лимитируется стадией растворения метакаолина и частично цеолита, а формирование цеолита на центрах зародышеобразования внутри гранулы

происходит после между 7-ми и 10-ми сут ГТО. Оптимизация состава исходных гранул (уменьшение количества цеолита) и условий гидротермальной обработки (повышение температуры), вероятно, сократит время кристаллизации цеолита в грануле. Полученные прочные гранулы цеолита будут подвергаться ионному обмену (в частности, на катионы лития и / или серебра) для дальнейшего их использования в качестве адсорбента для получения кислорода из воздуха.

Список источников

1. Мирошниченко Ю.В., Еникеева Р.А., Кассу Е.М. Характеристика способов получения кислорода медицинского и перспективы их применения в военном здравоохранении // Вестник Российской военно-медицинской академии. 2016. № 2 (54). С. 157–163.
2. Epietang F.E., Yang X., Li J., Wei Yu., Liu Y., Yang R.T. Air separation sorbents: Mixed-cation zeolites with minimum lithium and silver // *Chemical Engineering Science*. 2019. V. 198. P. 43–51. DOI: 10.1016/j.ces.2018.12.048
3. Ferreira D., Barcia P., Whitley R.D., Mendes A. Single-Stage Vacuum Pressure Swing Adsorption for Producing High-Purity Oxygen from Air // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2015. V. 54 (39). P. 9591–9604. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b02151
4. Способ получения цеолита типа А в качестве адсорбента. Патент RU(11) 2 395 451(13) C1.
5. Feltrin A.C., Mendes de Souza H., Fernandes de Aquino Th. Synthesis and ion exchange of zeolites produced from kaolin for separation of oxygen from atmospheric air // *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 2021. V. 18 (5). P. 1725–1733. DOI: 10.1111/ijac.13744
6. Treacy M.M.J., Higgins J.B. Collection of simulated XRD powder patterns for zeolite. Elsevier, 2017. 762 p.
7. Khemthong P., Prayoonpokarach S., Wittayakun J. Synthesis and characterization of zeolite LSX from rice husk silica // *Suranaree Journal of Science and Technology*. 2007. V. 14 (4). P. 367–379.
8. Thommes M., Kaneko K., Neimark A.V., Olivier J.P., Rodriguez-Reinoso F., Rouquerol J. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report) // *Pure and applied chemistry*. 2015. V. 87 (9-10). P. 1051–1069. DOI: 10.1515/pac-2014-1117

References

1. Miroshnichenko, Yu.V., Enikeeva, R.A. & Kassu, E.M. (2016) Characteristics of producing medical oxygen and prospects of its usage in military health care. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*. 2(54). pp. 157–163. (In Russian).
2. Epietang, F.E., Yang, X., Li, J., Wei, Yu., Liu, Y. & Yang, R.T. (2019) Air separation sorbents: Mixed-cation zeolites with minimum lithium and silver. *Chemical Engineering Science*. 198. pp. 43–51. DOI: 10.1016/j.ces.2018.12.048
3. Ferreira, D., Barcia, P., Whitley, R.D. & Mendes, A. (2015) Single-Stage Vacuum Pressure Swing Adsorption for Producing High-Purity Oxygen from Air. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 54(39). pp. 9591–9604. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b02151
4. A method for obtaining type A zeolite as an adsorbent. Patent RU(11) 2 395 451(13) C1.
5. Feltrin, A.C., Mendes de Souza, H. & Fernandes de Aquino, Th. (2021) Synthesis and ion exchange of zeolites produced from kaolin for separation of oxygen from atmospheric air. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 18(5). pp. 1725–1733. DOI: 10.1111/ijac.13744
6. Treacy, M.M.J. & Higgins, J.B. (2017) Collection of simulated XRD powder patterns for zeolite. Elsevier.
7. Khemthong, P., Prayoonpokarach, S. & Wittayakun, J. (2007) Synthesis and characterization of zeolite LSX from rice husk silica. *Suranaree Journal of Science and Technology*. 14(4). pp. 367–379.
8. Thommes, M., Kaneko, K., Neimark, A.V., Olivier, J.P., Rodriguez-Reinoso, F. & Rouquerol, J. (2015) Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface area and pore size distribution (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry*. 87(9-10). pp. 1051–1069. DOI: 10.1515/pac-2014-1117.

Информация об авторах:

Савельева Анна Сергеевна – кандидат химических наук, доцент кафедры физической и коллоидной химии химического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: blokhina_as@mail.ru

Мамонтов Григорий Владимирович – кандидат химических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией пористых материалов и сорбции химического факультета Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: grigoriymamontov@mail.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Savel'eva Anna S., Cand.Sc. (Chemistry), associate professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: blokhina_as@mail.ru

Mamontov Grigori V., Cand.Sc. (Chemistry), head of laboratory, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: grigoriymamontov@mail.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023

Научная статья
УДК 617-089.844
doi: 10.17223/7783494/1/5

Хирургическая реабилитация больных с нижнечелюстными дефектами с использованием материалов с памятью формы

Андрей Анатольевич Радкевич¹, Екатерина Сергеевна Марченко², Арина Андреевна Шишелова³

¹ Красноярский государственный медицинский университет им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого, Красноярск, Россия

^{2,3} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

¹ radkevich.andrey@yandex.ru

² 89138641814@mail.ru

³ arina.sh9906@gmail.com

Аннотация. Представлено применение эндопротезов на основе никелида титана в хирургическом устранении нижнечелюстных дефектов различного размера, конфигурации и этиологии на 72 больных от 7 до 76 лет. У 88,9% больных удалось достичь первичного заживления ран без повторного эндопротезирования. Установлено, что индивидуальные нижнечелюстные эндопротезы на основе никелида титана после помещения в зону дефекта длительно функционируют в организме, обеспечивая полноценное восстановление функциональных возможностей зубочелюстного аппарата.

Ключевые слова: никелид титана, сплавы с памятью формы, эндопротезирование нижней челюсти, челюстно-лицевая хирургия

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта Госзадание Минобрнауки России проект № FSWM-2022-0022.

Для цитирования: Радкевич А.А., Марченко Е.С., Шишелова А.А. Хирургическая реабилитация больных с нижнечелюстными дефектами с использованием материалов с памятью формы // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 24–33. doi: 10.17223/7783494/1/5

Original article
doi: 10.17223/7783494/1/5

Surgical rehabilitation of patients with mandibular defects using shape memory materials

Andrey A. Radkevich¹, Ekaterina S. Marchenko², Arina A. Shishelova³

¹ Krasnoyarsk State Medical University named after prof. V.F. Voino-Yasenytsky, Krasnoyarsk, Russian Federation

^{2,3} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation

¹ radkevich.andrey@yandex.ru

² 89138641814@mail.ru

³ arina.sh9906@gmail.com

Abstract. To compensate for the missing parts of the mandibular bone, endoprostheses are widely used, made mainly of titanium of various grades or other metallic and non-metallic materials that do not have viscoelastic properties. The elastic properties of such materials are at least 20 times lower than compact bone tissue. Such structures in the body are either rejected or behave like foreign bodies with negative consequences. Alloys based on titanium nickelide can solve this problem. Due to their unique properties, they are able to deform and restore their original shape during loading and unloading, like living bone and soft tissues. The aim of the study is to improve the effectiveness of surgical rehabilitation of patients with mandibular defects of various etiologies based on the development and application of new medical technologies using shape memory materials. With the use of medical materials developed at the Research Institute and implants with shape memory of mandibular endoprostheses made with the consideration of the individual characteristics of defects, on the basis of porous, nonporous and textile titanium nickelide, surgical treatment was performed in 72 patients, persons of both sexes, aged 7 to 76 years, with pathology of the temporomandibular joint, inflammatory changes, traumatic injuries, tumor and tumor-like conditions, anomalies of the mandibular bone from intraoral or extraoral accesses without immobilization of the lower jaw with the use of fixing structures in the form of titanium nickelide staples with shape memory effect. The use of titanium nickelide-based endoprostheses in the surgical removal of mandibular defects of various sizes, configurations and etiology helped to obtain satisfactory results in all operated patients. 64 (88.9%) patients received primary wound healing, in 6 cases the wounds healed a second time, in 3 cases repeated endoprosthetics were required. **Conclusion.** Due to the biocompatibility of titanium nickelide with body tissues, individual mandibular endoprostheses based on it, after being placed in the defect zone, function for a long time in the body, ensuring full restoration of the functional capabilities of the dental apparatus and minimizing all types of complications inherent in this type of intervention.

Keywords: titanium nickelide, shape memory alloys, mandibular arthroplasty, maxillofacial surgery

Acknowledgments: This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project No. FSWM-2020-0022.

For citation: Radkevich, A.A., Marchenko, E.S. & Shishelova, A.A. (2023) Surgical rehabilitation of patients with mandibular defects using shape memory materials. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 24–33. doi: 10.17223/7783494/1/5 (In Russian).

Введение

Дефекты нижнечелюстной кости, характеризующиеся нарушением ее непрерывности, возникают в результате воспалительных изменений, переломов неогнестрельного и огнестрельного происхождения и их осложнений, опухолевых и опухолеподобных состояний, деструктивных и продуктивных изменений нижнечелюстной головки при патологии височно-нижнечелюстного сочленения, в том числе и после оперативного извлечения последней, а также могут иметь врожденный генез. Неустранение таких дефектов ведет к нарушениям конфигурации вплоть до обезображивания лица, расстройствам функции жевания, глотания, дыхания и речи, возникновению деформаций зубных рядов и других костей лицевого скелета.

В целях устранения нижнечелюстных дефектов в практической челюстно-лицевой хирургии используют трансплантационные и имплантационные конструкции и материалы. Ксеногенные и аллогенные нижнечелюстные трансплантаты в настоящее время, за редким исключением [21, 25, 28], не применяются, несмотря на преимущество последних перед аутогенными трансплантатами в виде близости формы и размеров в соответствии с изъяном, отсутствие необходимости операционной травмы, в силу их резорбции после помещения в зону дефекта или отторжения, связанного с пересадкой трупного материала, необходимостью консервации, а также химической и температурной обработки, зачастую нарушающих их внутреннюю структуру. Недостатками аутогенных трансплантатов, помимо сложности придания необходимых размеров и конфигурации, следует считать необходимость нанесения дополнительной операционной травмы, связанной с забором материала. Кроме того, после свободной пересадки такие трансплантаты подвергаются остеокластической резорбции, так как через 2 ч после их обескровливания наступает гибель остеоцитов в их толще, что, несомненно, отрицательно сказывается на конечном результате операции.

В настоящее время большая часть зарубежных и отечественных специалистов использует в качестве трансплантатов комбинации лопаточных, подвздошных или берцовых костных материалов с окружающим их мягкотканым компонентом в сочетании с микрохирургической техникой, а также титановыми небюсовместимыми фиксирующими конструкциями [15, 17, 23, 24]. Данные методики являются дорогостоящими, требуют больших временных затрат, не лишены вышеописанных недостатков, высокотрав-

матичны, оставляют значительные неизгладимые изъяны на теле пациентов, ведущие к функциональным нарушениям организма, не исключены и некротические изменения пересаженных тканей, обусловленные тромбозом (особенно венозных сосудов) в ближайшем послеоперационном периоде.

Исходя из изложенного, многие хирурги для замещения отсутствующих частей нижнечелюстной кости стали применять эндопротезы, изготовленные в основном из титана различных марок или других металлических и неметаллических материалов, не обладающих свойствами вязкоупругости, обусловленными мартенситными превращениями в условиях знакопеременной деформации в процессе функционирования зубочелюстного аппарата [16, 18–20, 22, 26, 27]. Известно, что такие имплантационные материалы не являются биосовместимыми с тканями организма, так как их эластические свойства как минимум в 20 раз ниже компактной костной ткани [12]. Подобные конструкции в организме либо отторгаются, либо ведут себя как инородные тела со всеми вытекающими негативными последствиями.

В течение последних двух десятилетий в нашей стране в медицине широкое распространение получили биосовместимые пористые и непористые сверхэластичные материалы и имплантаты с памятью формы на основе никелида титана [12]. Эти имплантаты после помещения в тканевые дефекты не отторгаются, а биологические ткани врастают в их пористую структуру с образованием единого функционирующего с имплантационным материалом органотипичного регенерата, благодаря уникальным свойствам деформироваться и восстанавливать исходную форму при нагрузке и разгрузке подобно живым костным и мягким тканям. Данное обстоятельство позволило с высокой степенью эффективности применять указанные имплантаты для замещения утраченных тканей и органов в различных отраслях реконструктивной хирургии [1–5, 7–10], в том числе в стоматологии и челюстно-лицевой хирургии [6, 11, 13].

Цель работы. Повышение эффективности хирургической реабилитации больных с нижнечелюстными дефектами различной этиологии на основе разработки и применения новых медицинских технологий с использованием материалов с памятью формы.

Материалы и методы исследования

Нижнечелюстные дефекты (ветви, включающие нижнечелюстную головку или без таковой, угла, тела, имеющие различные комбинации перечисленно-

го) замещали с помощью эндопротезов, разработанных в НИИ медицинских материалов и имплантатов с памятью формы (г. Томск) на основе пористого, непористого и текстильного никелида титана. Эндопротезы изготавливали с учетом индивидуальных особенностей конфигурации изъяна, используя литографические модели нижней челюсти и средней зоны лицевого черепа пациентов. Каркас эндопротеза состоит из никелид-титановой пластины марки ТН-10 длиной несколько большей протяженности дефекта с учетом фиксации к сохранившейся части нижнечелюстной кости, шириной 15–25 мм, толщиной 1,5 мм, с наружной и внутренней стороны которой фиксированы пластины никелида титана, толщиной 2,0 мм со сквозной пористостью 55–60%, коэффициентом проницаемости в интервале 2×10^{-13} – 3×10^{-6} м² и следующим распределением пор по раз-

меру: 10^{-2} – 10^{-1} мкм – 2%, 10^{-1} – 10^1 мкм – 6%, 10^1 – 10^2 мкм – 25%, 10^2 – 4×10^2 мкм – 45%, свыше 4×10^2 мкм – остальное. В случаях необходимости замещения нижнечелюстной головки данный эндопротез изготавливают с соответствующим утолщением пористого материала на конце и поверхностной зашлифовкой пористости со всех сторон. В целях устранения острых краев и прорезывания эндопротеза после установки в зону дефекта в процессе функционирования зубочелюстного аппарата, а также обеспечения большей гармонии взаимодействия последнего с реципиентными тканями пористую часть конструкции покрывали тонкопрофильным текстильным никелидом титана, изготовленным из нити толщиной 40–50 мкм путем двойного или тройного плетения, ширина ячейки которого составляет 1×1 – 3×3 мм [14] (рис. 1).

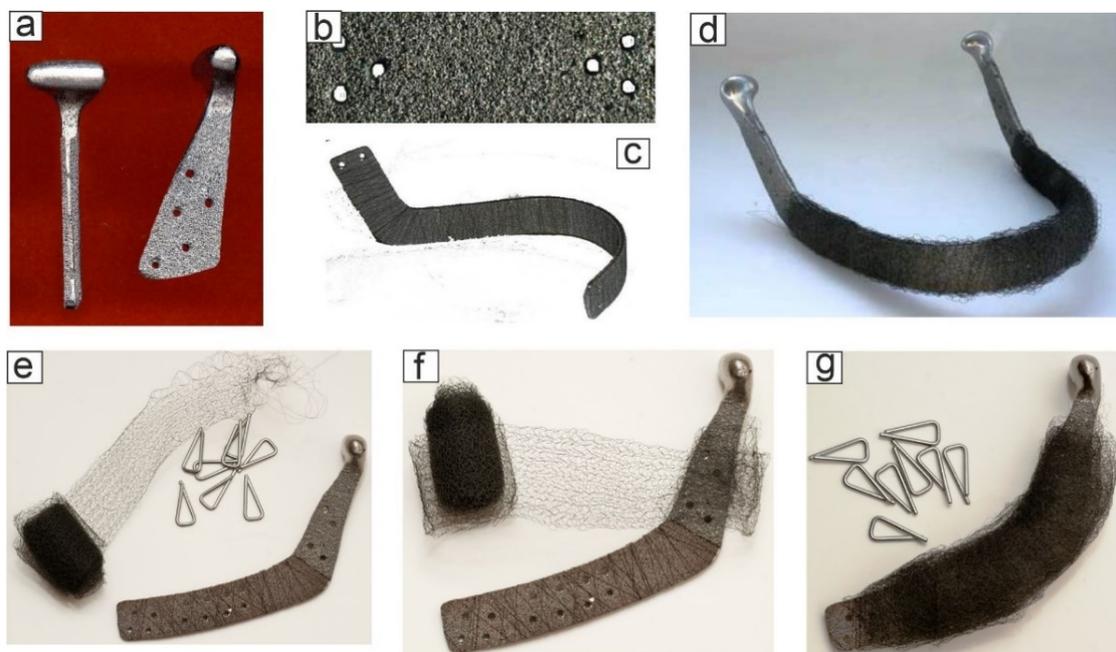


Рис. 1. Варианты эндопротезов нижней челюсти на основе пористого никелида титана: *a* – задней части ветви, включающий головку; *b* – частичный тела; *c* – частичный ветви, угла и тела, включающий подбородочную часть; *d* – полный; *e*–*g* – частичный ветви, угла и тела в комбинации с текстильным никелидом титана

Fig. 1. Variants of mandibular endoprostheses made of porous titanium nickelide: *a* – the back of the branch, including the head; *b* – partial body; *c* – partial branch, angle and body, including the chin part; *d* – complete; *e*–*g* – partial branch, angle and body in combination with textile titanium nickelide

Техника операции. После доступа к очагу поражения со стороны ротовой полости или из зачелюстной, поднижнечелюстной, подподбородочной областей либо путем использования их комбинаций обнажали зону дефекта или патологически измененную часть нижней челюсти, последнюю резецировали. В случаях замещения нижнечелюстной головки у больных с патологией височно-нижнечелюстного сустава выполняли остеотомию ветви от вырезки по направлению к середине заднего края выше проекции нижнечелюстного

отверстия, затем извлекали задний остеотомированный фрагмент. Если в результате удаления патологических тканей образовывалась сквозная рана, то ее ушивали наглухо в 2–3 слоя. Далее образовывали декортицированную наружную поверхность со стороны остеотомированного края сохраненного/ых фрагментов челюсти, соответствующую наложению части замещающей конструкции, необходимой для ее фиксации, после чего устанавливали эндопротез в зону дефекта (при отсроченных вмешательствах выполняли предвари-

тельную репозицию фрагментов). Для восполнения нижнечелюстной головки аналогичную часть эндопротеза устанавливали в подвисочную позицию, культю латеральной крыловидной мышцы фиксировали к шейке искусственной головки. Фиксацию эндопротеза осуществляли при помощи фиксирующих устройств из никелида титана в виде скоб, обладающих эффектом памяти формы (рис. 2) [11]. Рану послойно ушивали с наружным дренированием.

Согласно разработанной технологии выполнено хирургическое лечение 72 больных в возрасте от 7 до 76 лет с различными патологическими состояниями нижней челюсти, приведшими к возникновению костных дефектов, включающими воспалительные процессы, травматические повреждения и их осложнения, опухолевые и опухолеподобные состояния, аномалии и патологию височно-нижнечелюстных суставов (таблица).



Рис. 2. Фиксирующие конструкции из никелида титана с памятью формы

Fig. 2. Fixing structures made of titanium nickelide with shape memory

Количественное распределение больных с патологией нижней челюсти в зависимости от нозологии и возраста (n = 72)

Группа больных	Нозологическая форма	Возраст, лет	Количество больных
1	Височно-нижнечелюстные остеоартрозо-артриты	25–76	12
2	Височно-нижнечелюстные деформирующие остеоартрозы	34–75	6
3	Височно-нижнечелюстные анкилозы	7–18	9
4	Остеомиелиты различной этиологии	16–74	5
5	Травматические повреждения нижнечелюстной головки	18–47	4
6	Опухолеподобные состояния	13–48	5
7	Доброкачественные новообразования	17–68	19
8	Злокачественные новообразования	56–73	10
9	Аномалии ветви и нижнечелюстной головки, включающие вторичные деформации	16–25	3
Всего		7–76	73*

* Несоответствие количественной характеристики больных итоговому значению связано с имеющейся в одном случае сочетанной патологией.

Из 34 больных 1–3, 5 и 9-й групп одностороннее замещение нижнечелюстной головки выполнено у 25, двустороннее, в основном с височно-нижнечелюстными анкилозами, – у 9. В 4-й группе в одном случае замещение ветви и угла, включая нижнечелюстную головку, осуществлено по поводу приобретенного дефекта в результате гематогенного

остеомиелита, перенесенного в раннем детском возрасте, угла и тела у одного пациента – в результате хронического одонтогенного, у остальных – травматического остеомиелита. 5-я группа больных характеризовалась наличием переломов собственно нижнечелюстной головки или оскольчатого перелома мышечкового отростка нижней челюсти, а также

функциональной несостоятельностью малого отломка после репозиции. Опухолоподобные состояния в основном были представлены фиброзной дисплазией, кистозными поражениями нижнечелюстной головки, радикулярными кистами, распространяющиеся в зоны ветви, угла и тела челюсти до подбородочного отдела, а также деструкцией вышеописанной локализации, обусловленной гиперпаратиреоидизмом. Группа доброкачественных новообразований включала большую часть амелобластом, в меньшем количестве губчатые остеомы, гигантоклеточную опухоль, миксофибром. Злокачественные процессы выявлялись в виде первичного и вторичного рака и остеогенной саркомы. Замещение нижнечелюстной головки осуществляли непосредственно после извлечения остеотомированного фрагмента. У 20 больных 4, 7 и 8-й групп было выполнено непосредственное замещение изъяна, в остальных 14 случаях (8 пациентов со злокачественными и 4 с доброкачественными новообразованиями) проведено отсроченное эндопротезирование. Показаниями к отсроченному возмещению дефектов служили признаки нагноения и недостаточность временных резервов для индивидуального изготовления замещающей конструкции. Относительным противопоказанием к первичному эндопротезированию следует считать злокачественные опухолевые процессы.

Особенностью послеоперационного ведения больных являлось отсутствие необходимости иммобилизации нижней челюсти, что способствовало ранней функциональной нагрузке.

После заживления ран и устранения явлений отека мягких тканей челюстно-лицевой области в зависимости от показаний в целях замещения дефектов зубных рядов больным изготавливали зубочелюстные протезы, опирающиеся на эндопротез, ткани протезного ложа, прилегающие к верхнему краю последнего и оставшуюся часть челюсти и нижнего зубного ряда. Базисы таких протезов формировали из литейного стоматологического сплава «Титанид», обладающего свойствами биосовместимости и сверхэластичности, что предупреждало атрофию опорных тканей в процессе пользования [6].

Результаты хирургических лечебных мероприятий оценивали в ближайшем послеоперационном периоде и в отдаленные сроки от 12 до 60 мес на основании клиники, рентгенодиагностики в виде ортопантограмм, прямых и боковых рентгенограмм лицевого черепа, компьютерных томограмм лицевого скелета.

Результаты исследования

Наблюдения за больными показали высокую эффективность разработанной технологии. У пациентов после замещения нижнечелюстной головки в связи с

патологией височно-нижнечелюстного сустава во всех случаях выявлялось первичное заживление ран. Спустя 3–4 нед больные могли принимать жесткую пищу. Благодаря устранению отека явлений в подвисочной области к этому сроку восстанавливалось пространственное положение нижней челюсти, о чем свидетельствовало удовлетворительное смыкание зубных рядов, полноценное открывание рта и нормализация боковых движений челюсти.

В других группах (пациенты после восполнения дефектов, включающих угол и тело нижней челюсти, $n = 38$) у 30 человек раны зажили первично. У остальных определялось частичное расхождение швов в проекции замещаемой части тела челюсти. В 2 случаях заживление происходило вторично, вдоль имплантационного материала, в 3 – потребовалась частичная замена текстильной оболочки эндопротеза в проекции разобщения, в 3 – осложнение устранили повторным эндопротезированием.

В отдаленные сроки больные жалоб не предъявляли. Во всех случаях удалось достичь нормализации конфигурации лица, удовлетворительного восстановления анатомо-функциональных возможностей зубочелюстного аппарата.

Рентгенологически отмечали отсутствие рецидивов (процедивов) заболеваний, полноценное соединение эндопротезов с реципиентными зонами нижнечелюстных костей. Явлений резорбции костной ткани в зонах фиксации и прилегания установленных конструкций, а также их неудовлетворительного состояния не наблюдали.

В качестве иллюстрации приводим наблюдение.

Больная И., 34 года, обратилась по поводу процедуры амелобластомы тела нижней челюсти справа. Из анамнеза: больна в течение 10 лет, ранее трижды оперирована путем выскабливания патологических тканей со стороны полости рта, эффекта не наступило, всякий раз отмечала продолженный рост опухоли (рис. 3). После рентгенологического обследования выявлены деструктивные изменения правой головки нижней челюсти (рис. 4). Выполнена операция – правосторонняя резекция задней части правой ветви, включая нижнечелюстную головку, тела нижней челюсти с сохранением части ветви и угла, эндопротезирование с применением индивидуальных ортопедических конструкций, изготовленных из сплавов на основе никелида титана, согласно разработанной технологии (рис. 5). Послеоперационный период протекал без осложнений, заживление ран – первичное. Через 2 мес был изготовлен зубочелюстной протез с базисом из никелида титана. При осмотре через 3 года больная жалоб не предъявляла, рот открывает в полном объеме, состояние зубочелюстного аппарата удовлетворительное, функциональных нарушений, связанных с выполненной операцией, не определялось. Рентгенологически деструктивных изменений оставшихся частей нижнечелюстной кости не выявлено, стояние эндопротезов удовлетворительное (рис. 6).

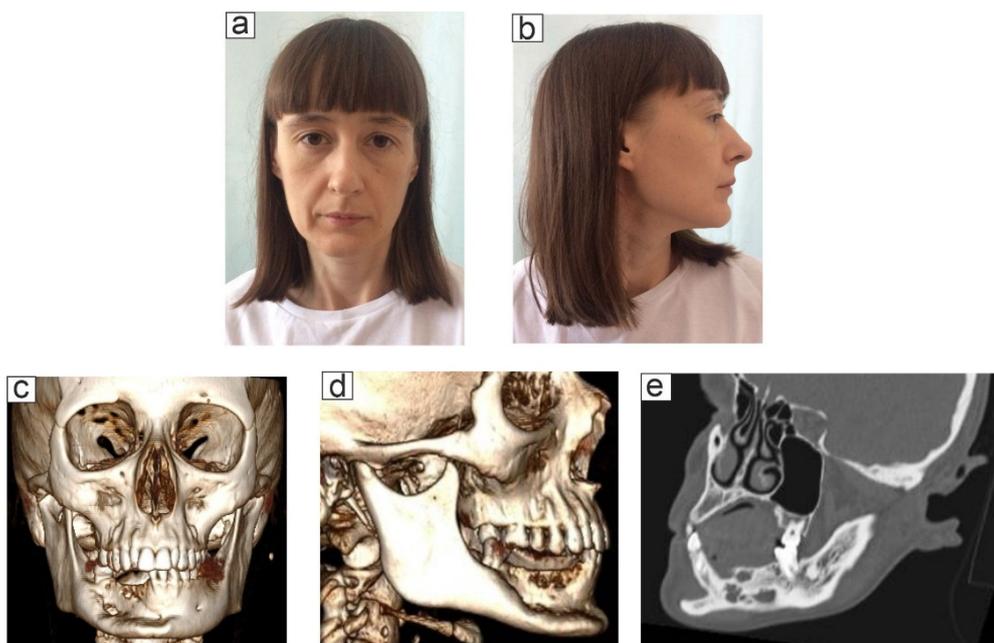


Рис. 3. Больная И. до оперативного лечения: *a, d* – внешний вид; *c-e* – рентгенологическая картина

Fig. 3. Patient I. before surgical treatment: *a, d* – appearance; *c-e* – X-ray picture

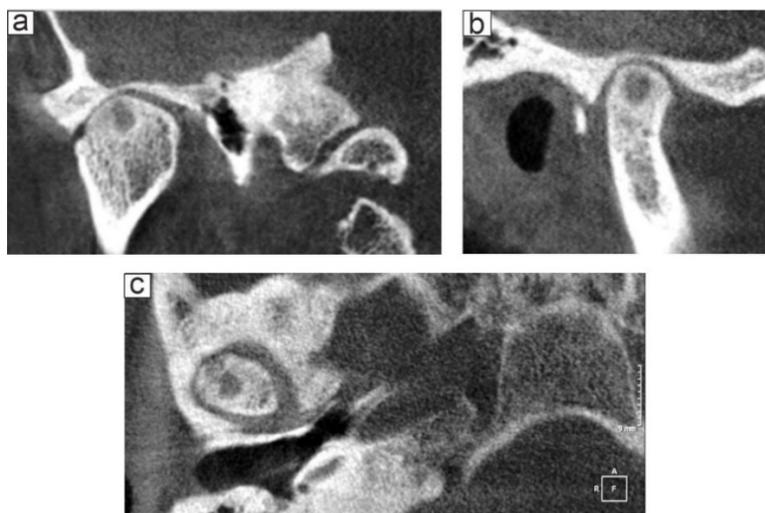


Рис. 4. Рентгенологическая картина состояния правой нижнечелюстной головки больной И.:
a – прямая проекция, *b* – латеральная проекция, *c* – фронтальная проекция

Fig. 4. X-ray picture of the state of the right mandibular head of patient I.:
a – direct projection, *b* – lateral projection, *c* – frontal projection

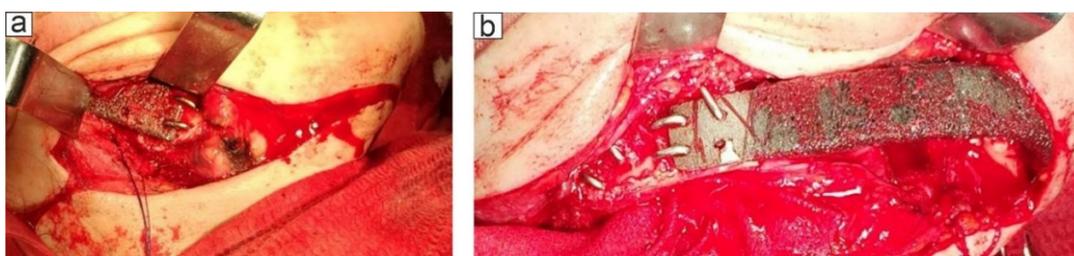


Рис. 5. Больная И.: *a* – состояние операционной раны после замещения нижнечелюстной головки;
b – состояние операционной раны после замещения тела нижней челюсти

Fig. 5. Patient I.: *a* – condition of the surgical wound after replacement of the mandibular head;
b – the state of the surgical wound after replacing the body of the lower jaw

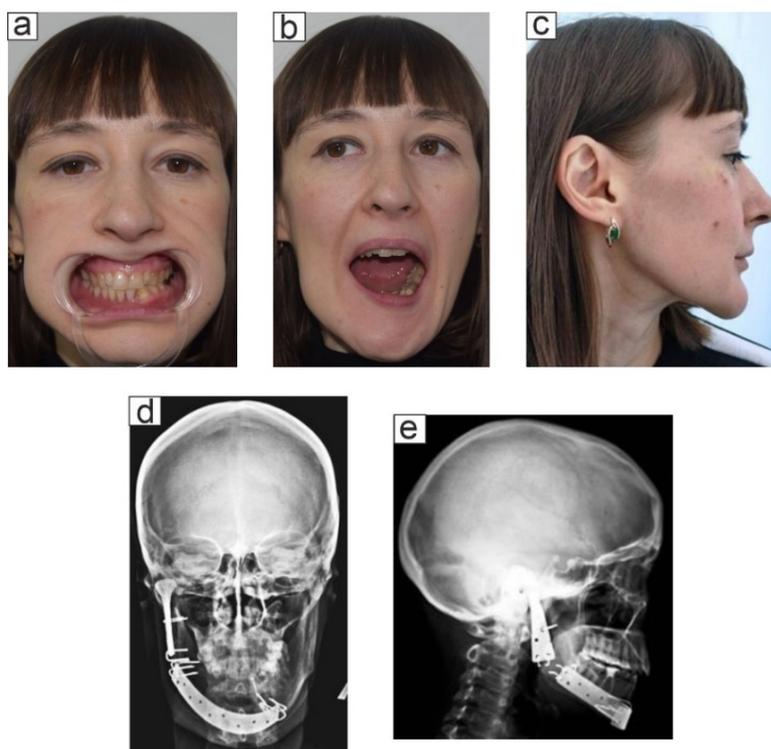


Рис. 6. Больная И. через 3 года после оперативного лечения:
a-c – внешний вид; *d, e* – рентгенологическая картина

Fig. 6. Patient I. 3 years after surgical treatment: *a-c* – appearance; *d, e* – X-ray picture

Заключение

Применение комбинированных эндопротезов из никелида титана позволяет с высокой степенью эффективности устранять дефекты нижнечелюстной кости различной этиологии, размеров и конфигурации. Благодаря биосовместимости никелида титана с тканями организма такие эндопротезы не отторгаются, а соединительные ткани со стороны реципиентных областей прорастают сквозь их пористую и сетчатую структуру, образуя единый с имплантационным материалом соединительнотканый регенерат, что способствует гармоничному взаимодействию имплантируемой системы в процессе функционирования. Внутренняя монолитная часть обеспечивает прочностные свойства конструкции. Текстильное никелид-титановое покрытие основной части конструкции, за исключением нижнечелюстной головки, предотвращает прорезывание эндопротеза сквозь слизистую оболочку ротовой полости и кожные покровы зачелюстной, поднижнечелюстной, подбородочной и подподбородочной областей, толщина данного покрытия (т.е. количество слоев) определяется необходимостью компенсации объема потерянного мягкотканного компонента для нормализации конфигурации лица. Гистерезисное поведение данных эндопротезов в процессе нагрузки и разгрузки подобное биологическим тканям (т.е. много-

кратная подверженность знакопеременной деформации), предотвращает разрушение поверхностных оксидных слоев, препятствующих высвобождению оксидов титана в толщу окружающих тканей.

Фиксирующие никелид-титановые конструкции дают возможность эластической надежной фиксации имплантируемой конструкции, что обеспечивает раннюю функциональную нагрузку, т.е. без иммобилизации нижней челюсти.

Эластическая фиксация в пределах 2% деформации, в отличие от жесткой фиксации, не препятствует капиллярному движению биологических жидкостей в костных структурах и в толще имплантационного материала, тем самым оптимизируя репаративные процессы в зоне вмешательства. Отсутствие пластической деформации фиксирующих элементов в вышеуказанных пределах нагрузки предотвращает последующее смещение эндопротезов за счет мышечной тяги.

Зашлифованная поверхность искусственной нижнечелюстной головки, в совокупности с ранней функциональной нагрузкой, исключает ее сращение с тканями подвисочной области, чем достигается полноценное открывание рта, а удовлетворительное функционирование латеральной крыловидной мышцы, фиксированной к шейке эндопротеза, обеспечивает боковые движения нижней челюсти.

Список источников

1. Бахаев В.В., Гюнтер В.Э., Дамбаев Е.Ц. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в гинекологии. Т. 6. Томск : МИЦ, 2010. 220 с.
2. Чойнзонов Е.Л., Гюнтер В.Э., Мухаммедов М.Р. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в онкологии. Т. 13. Томск : МИЦ, 2013. 336 с.
3. Запускалов И.В., Гюнтер В.Э., Стеблюк А.Н. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в офтальмологии. Т. 14. Томск : МИЦ, 2012. 192 с.
4. Штофин С.Г., Гюнтер В.Э., Анищенко В.В. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в панкреатобилиарной хирургии. Т. 12. Томск : МИЦ, 2013. 126 с.
5. Ивченко О.А., Гюнтер В.Э., Дамбаев Г.Ц. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в сосудистой хирургии. Т. 10. Томск : МИЦ, 2012. 178 с.
6. Миргазизов М.З., Гюнтер В.Э., Галонский В.Г. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Материалы и имплантаты с памятью формы в стоматологии. Т. 5. Томск : МИЦ, 2011. 220 с.
7. Ланишаков В.А., Гюнтер В.Э., Плоткин Г.Л. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в травматологии и ортопедии. Т. 2. Томск : МИЦ, 2010. 282 с.
8. Шкуратов С.И., Гюнтер В.Э., Дамбаев Г.Ц. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в урологии. Т. 7. Томск : МИЦ, 2009. 248 с.
9. Дамбаев Г.Ц., Гюнтер В.Э., Зиганьшин Р.В. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в хирургии. Т. 11. Томск : МИЦ, 2012. 398 с.
10. Фомичев Н.Г., Гюнтер В.Э., Луцки А.А. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в хирургии позвоночника. Т. 3. Томск : МИЦ, 2011. 374 с.
11. Сысолятин П.Г., Гюнтер В.Э., Сысолятин С.П. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Имплантаты с памятью формы в челюстно-лицевой хирургии. Т. 4. Томск : МИЦ, 2012. 384 с.
12. Гюнтер В.Э., Ходоренко В.Н., Чекалкин Т.Л. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Медицинские материалы с памятью формы. Т. 1. Томск : МИЦ, 2011. 534 с.
13. Звигинцев М.А., Гюнтер В.Э., Старосветский С.И. и др. Медицинские материалы и имплантаты с памятью формы. Медицинские материалы с памятью формы при стоматологическом лечении больных сахарным диабетом. Т. 8. Томск : МИЦ, 2010. 168 с.
14. Гюнтер С.В., Дамбаев Г.Ц., Гюнтер В.Э. и др. Новые технологии создания медицинских материалов, имплантатов и аппаратов на основе никелида титана с использованием инфракрасного излучения. Томск : МИЦ, 2017. 234 с.
15. Семенов М.Г., Голяна С.И., Михайлов В.В., Афоничев К.А., Филиппова О.В., Степанова Ю.В. Реконструкция нижней челюсти с использованием васкуляризованного костного трансплантата – основной этап комплексной реабилитации ребенка с остеобластокластомой нижней челюсти // Ортопедия, травматология и восстановительная хирургия детского возраста. 2021. Т. 9, № 4. С. 456–464. DOI: 10.17816/PTORS73184
16. Gorrela H., Alwala A.M., Ramesh K., Tunkimella S., Prakash R., Zainuddinelyashkan Y. Arthroplasty Followed by Distraction Osteogenesis Versus Distraction Osteogenesis Followed by Arthroplasty in the Management of TMJ Ankylosis: A Comparative Study // Journal of Maxillofacial and Oral Surgery. 2021. V. 20. P. 674–679. DOI: 10.1007/s12663-020-01463-3
17. Che W.L., Ye J.T., Yang Z.H., Huang Z.Q., Zhang D.M., Wang K. Reverse facial artery-submental artery mandibular osteomuscular flap for the reconstruction of maxillary defects following the removal of benign tumors // Head & Neck: Journal for the Sciences and Specialties of the Head and Neck. 2009. V. 31(6). P. 725–731. DOI: 10.1002/hed.21025
18. Oldhoff M.G.E., Mirzaali M.J., Tümer N., Zhou J., Zadpoor A.A. Comparison in clinical performance of surgical guides for mandibular surgery and temporomandibular joint implants fabricated by additive manufacturing techniques // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2021. V. 119. P. 104512. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104512
19. Teschke M., Christensen A., Far F., Reich R.H., Naujokat H. Digitally designed, personalized bone cement spacer for staged TMJ and mandibular reconstruction – introduction of a new technique // Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery. 2022. V. 49(10). P. 935–942. DOI: 10.1016/j.jcms.2021.05.002
20. Aquino V.M., Rock J.P., Perry K.D., Barbetta B.T. Functional reconstruction of the glenoid fossa utilizing a pedicled temporal osteomuscular flap // Oral and Maxillofacial Surgery Cases. 2022. V. 8(1). P. 100243. DOI: 10.1016/j.omsc.2022.100243
21. Alfi D.M., Hassan A., East S.M., Gianulis E.C. Immediate Mandibular Reconstruction Using a Cellular Bone Allograft Following Tumor Resection in a Pediatric Patient // Face. 2021. V. 2(4). P. 490–495. DOI: 10.1177/27325016211057287
22. Likhterov I., Roche A.M., Urken M.L. Contemporary Osseous Reconstruction of the Mandible and the Maxilla // Oral and Maxillofacial Surgery Clinics. 2019. V. 31(1). P. 101–116. DOI: 10.1016/j.coms.2018.08.005
23. Zanine R., Mizouni H., El Korbi A., Beltaief N., Sahtout S., Besbes G. Maxillary bone myxoma // European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases. 2014. V. 131(4). P. 257–259. DOI: 10.1016/j.anorl.2013.04.004
24. Bianchi B., Ferri A., Ferrari S., Copelli C., Sesenna E. Maxillary reconstruction using anterolateral thigh flap and bone grafts // Microsurgery: Official Journal of the International Microsurgical Society and the European Federation of Societies for Microsurgery. 2009. V. 29(6). P. 430–436. DOI: 10.1002/micr.20619
25. Pogrel M.A. The Concept of Stress Shielding in Nonvascularized Bone Grafts of the Mandible – Review of 2 Cases // Journal of Oral and Maxillofacial Surgery. 2020. V. 79(1). P. 266e1–266e5. DOI: 10.1016/j.joms.2020.09.024
26. Atef M., Mounir M., Shawky M., Mounir S., Gibaly A. Polyetheretherketone patient-specific implants (PPSI) for the reconstruction of two different mandibular contour deformities // Oral and Maxillofacial Surgery. 2022. V. 26(10). P. 299–309. DOI: 10.1007/s10006-021-00984-6
27. Farajpour H., Bastami F., Bohlouli M., Khojasteh A. Reconstruction of bilateral ramus-condyle unit defect using custom titanium prosthesis with preservation of both condyles // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. 2021. V. 124. P. 104765. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104765

28. Ryu B., Abraham III C., Polido W.D. Treatment of Mandibular Non-union Using Patient Specific Crib Cage Plates and Cellular Bone Allograft: A Case Report // *Craniomaxillofacial Trauma & Reconstruction Open*. 2021. V. 6. DOI: 10.1177/247275122111005949

References

1. Bakhaev, V.V., Gunter, V.E., Dambaev, E.Ts., et al. (2010) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v ginekologii. T. 6* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in gynecology. V. 6]. Tomsk: MIC.
2. Choinzonov, E.L., Gunter, V.E., Mukhammedov, M.R., et al. (2013) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v onkologii. T. 13* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in oncology. V. 13]. Tomsk: MIC.
3. Zapuskalov, I.V., Gunter, V.E., Steblyuk, A.N., et al. (2012) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v oftal'mologii. T. 14* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in ophthalmology. V. 14]. Tomsk: MIC.
4. Shtofin, S.G., Gunter, V.E., Anishchenko, V.V., et al. (2013) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v pankreatobiliarnoy hirurgii. T. 12* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in pancreatobiliary surgery. V. 12]. Tomsk: MIC.
5. Ivchenko, O.A., Gunter, V.E., Dambaev, G.Ts., et al. (2012) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v sosudistoy hirurgii. T. 10* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in vascular surgery. V. 10]. Tomsk: MIC.
6. Mirgazizov, M.Z., Gunter, V.E., Galonsky, V.G., et al. (2011) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Materialy i implantaty s pamyat'yu formy v stomatologii. T. 5* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory materials and implants in dentistry. V. 5]. Tomsk: MIC.
7. Lanshakov, V.A., Gunter, V.E., Plotkin, G.L., et al. (2010) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v travmatologii i ortopedii. T. 2* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in traumatology and orthopedics. V. 2]. Tomsk: MIC.
8. Shkuratov, S.I., Gunter, V.E., Dambaev, G.Ts., et al. (2009) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v urologii. T. 7* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in urology. V. 7]. Tomsk: MIC.
9. Dambaev, G.Ts., Gunter, V.E., Ziganshin, R.V., et al. (2012) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v hirurgii. T. 11* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in surgery. V. 11]. Tomsk: MIC.
10. Fomichev, N.G., Gunter, V.E., Lutsik, A.A., et al. (2011) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v hirurgii pozvonochnika. T. 3* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in spinal surgery. V. 3]. Tomsk: MIC.
11. Sysolyatin, P.G., Gunter, V.E., Sysolyatin, S.P., et al. (2012) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Implantaty s pamyat'yu formy v chelyustno-licevoj hirurgii. T. 4* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory implants in maxillofacial surgery. V. 4]. Tomsk: MIC.
12. Gunter, V.E., Khodorenko, V.N., Chekalkin, T.L., et al. (2011) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Medicinskie materialy s pamyat'yu formy. T. 1* [Medical materials and shape memory implants. Shape memory medical materials. V. 1]. Tomsk: MIC.
13. Zvigintsev, M.A., Gunter, V.E., Starosvetsky, S.I., et al. (2010) *Medicinskie materialy i implantaty s pamyat'yu formy. Medicinskie materialy s pamyat'yu formy pri stomatologicheskoy lechenii bol'nyh saharnym diabetom. T. 8* [Medical materials and shape memory implants. Medical materials with shape memory in the dental treatment of patients with diabetes mellitus. V. 8]. Tomsk: MIC.
14. Gunter, S.V., Dambaev, G.Ts., Gunter, V.E., et al. (2017) *Novye tekhnologii sozdaniya medicinskih materialov, implantatov i apparatov na osnove nikelida titana s ispol'zovaniem infrakrasnogo izlucheniya* [New technologies for creating medical materials, implants and devices based on titanium nickelide using infrared radiation]. Tomsk: MIC.
15. Semenov, M.G., Golyana, S.I., Mikhailov, V.V., Afonichev, K.A., Filippova, O.V. & Stepanova, Yu.V. (2021) Lower jaw reconstruction using a vascularized bone graft is the main stage of complex rehabilitation of a child with lower jaw osteoblastoclastoma. *Pediatric Traumatology, Orthopaedics and Reconstructive Surgery*. 9(4) pp. 456–464. DOI: 10.17816/PTORS73184.
16. Gorrela, H., Alwala, A.M., Ramesh, K., Tunkimela, S., Prakash, R. & Zainuddin Yashkhan, Y. (2021) Arthroplasty Followed by Distraction Osteogenesis Versus Distraction Osteogenesis Followed by Arthroplasty in the Management of TMJ Ankylosis: A Comparative Study. *Journal of Maxillofacial and Oral Surgery*. 20. pp. 674–679. DOI: 10.1007/s12663-020-01463-3
17. Che, W.L., Ye, J.T., Yang, Z.H., Huang, Z.Q., Zhang, D.M. & Wang, K. (2009) Reverse facial artery-submental artery mandibular osteomuscular flap for the reconstruction of maxillary defects following the removal of benign tumors. *Head & Neck: Journal for the Sciences and Specialties of the Head and Neck*. 31(6). pp. 725–731. DOI: 10.1002/hed.21025
18. Oldhoff, M.G.E., Mirzaali, M.J., Tumer, N., Zhou, J. & Zadpoor, A.A. (2021) Comparison in clinical performance of surgical guides for mandibular surgery and temporomandibular joint implants fabricated by additive manufacturing techniques. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 119. p. 104512. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104512
19. Teschke, M., Christensen, A., Far, F., Reich, R.H., Naujokat, H. (2022) Digitally designed, personalized bone cement spacer for staged TMJ and mandibular reconstruction – introduction of a new technique. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*. 49(10). pp. 935–942. DOI: 10.1016/j.jcms.2021.05.002
20. Aquino, V.M., Rock, J.P., Perry, K.D., Barbeta, B.T. (2022) Functional reconstruction of the glenoid fossa utilizing a pedicled temporal osteomuscular flap. *Oral and Maxillofacial Surgery Cases*. 8(1). p. 100243. DOI: 10.1016/j.omsc.2022.100243
21. Alfí, D.M., Hassan, A., East, S.M., Gianulis, E.C. (2021) Immediate Mandibular Reconstruction Using a Cellular Bone Allograft Following Tumor Resection in a Pediatric Patient. *Face*. 2(4). pp. 490–495. DOI: 10.1177/27325016211057287

22. Likhterov, I., Roche, A.M. & Urken, M.L. (2014) Contemporary Osseous Reconstruction of the Mandible and the Maxilla. *Oral and Maxillofacial Surgery Clinics*. 31(1). pp. 101–116. DOI: 10.1016/j.coms.2018.08.005
23. Zainine, R., Mizouni, H., El Korbi, A., Beltaief, N., Sahtout, S. & Besbes, G. (2014) Maxillary bone myxoma. *European Annals of Otorhinolaryngology, Head and Neck Diseases*. 131(4). pp. 257-259. DOI: 10.1016/j.anorl.2013.04.004
24. Bianchi, B., Ferri, A., Ferrari, S., Copelli, C. & Sesenna, E. (2020) Maxillary reconstruction using anterolateral thigh flap and bone grafts. *Microsurgery: Official Journal of the International Microsurgical Society and the European Federation of Societies for Microsurgery*. 29(6). pp. 430-436. DOI: 10.1002/micr.20619
25. Pogrel, M.A. (2020) The Concept of Stress Shielding in Nonvascularized Bone Grafts of the Mandible – Review of 2 Cases. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*. 79(1). pp. 266e1–266e5. DOI: 10.1016/j.joms.2020.09.024
26. Atef, M., Mounir, M., Shawky, M., Mounir, S. & Gibaly, A. (2022) Polyetheretherketone patient-specific implants (PPSI) for the reconstruction of two different mandibular contour deformities. *Oral and Maxillofacial Surgery*. 26(10). pp. 299-309. DOI: 10.1007/s10006-021-00984-6
27. Farajpour, H., Bastami, F., Bohlouli, M., Khojasteh, A. (2021) Reconstruction of bilateral ramus-condyle unit defect using custom titanium prosthesis with preservation of both condyles. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 124. p. 104765. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2021.104765
28. Ryu, B., Abraham III, C. & Polido, W.D. (2021) Treatment of Mandibular Non-union Using Patient Specific Crib Cage Plates and Cellular Bone Allograft: A Case Report. *Craniofacial Trauma & Reconstruction Open*. 6. DOI: 10.1177/24727512211005949

Информация об авторах:

Радкевич Андрей Анатольевич – доктор медицинских наук, профессор кафедры хирургической стоматологии и челюстно-лицевой хирургии Красноярского государственного медицинского университета им. проф. В.Ф. Войно-Ясенецкого (Красноярск, Россия). E-mail: radkevich.andrey@yandex.ru

Марченко Екатерина Сергеевна – доктор физико-математических наук, заведующая лабораторией сверхэластичных биоинтерфейсов Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: 89138641814@mail.ru

Шишелова Арина Андреевна – студентка Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: arina.sh9906@gmail.com

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Radkevich Andrey A., Dr.Sc. (Medicine), professor, Krasnoyarsk State Medical University named after prof. V.F. Voino-Yasenetsky (Krasnoyarsk, Russian Federation). E-mail: radkevich.andrey@yandex.ru

Marchenko Ekaterina S., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), head of the laboratory, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: 89138641814@mail.ru

Shishelova Arina A., student, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: arina.sh9906@gmail.com

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023

Научная статья
УДК 614.841.12
doi: 10.17223/7783494/1/6

Влияние фторированных углеводородов на концентрационные пределы распространения пламени в смесях $H_2 - N_2O$ и $CH_4 - N_2O$

Алексей Юрьевич Шебеко¹, Юрий Николаевич Шебеко², Андрей Владимирович Зубань³

^{1, 2, 3} *Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России, Балашиха, Россия*

¹ *ay_shebeko@mail.ru*

² *yn_shebeko@mail.ru*

³ *avzuban@mail.ru*

Аннотация. Проведено экспериментальное определение концентрационных пределов распространения пламени в смесях горючий газ (метан, водород) – закись азота – фторированный углеводород (трифторметан CHF_3 , пentaфторэтан C_2HF_5 , перфторбутан C_4F_{10}). Обнаружены существенно более низкие по сравнению с горением в воздухе значения нижних концентрационных пределов распространения пламени и заметно более высокие величины верхних концентрационных пределов. Составы смесей в точках флегматизации (мыс полуострова распространения пламени) характеризуются низкими значениями коэффициента избытка горючего φ (в большинстве случаев $\varphi < 0,1$), в то время как для случая горения в воздухе и азотокислородной среде с содержанием O_2 25% (об.) величины φ , как правило, превышают 0,5. Установлено, что флегматизирующие концентрации каждого из изученных фторированных углеводородов при горении метана и водорода в закиси азота достаточно близки друг к другу в отличие от горения в окислительных средах, состоящих из азота и кислорода. Дана качественная интерпретация полученных результатов.

Ключевые слова: закись азота, концентрационные пределы распространения пламени, фторированный углеводород, водород, метан

Для цитирования: Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Зубань А.В. Влияние фторированных углеводородов на концентрационные пределы распространения пламени в смесях H_2-N_2O и CH_4-N_2O // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 34–42. doi: 10.17223/7783494/1/6

Original article
doi: 10.17223/7783494/1/6

Influence on fluorocarbons flammability limits in the mixtures of H_2-N_2O and CH_4-N_2O

Aleksey Yu. Shebeko¹, Yuriy N. Shebeko², Andrey V. Zuban³

^{1, 2, 3} *All-Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Balashikha, Russian Federation*

¹ *ay_shebeko@mail.ru*

² *yn_shebeko@mail.ru*

³ *avzuban@mail.ru*

Abstract. An experimental determination of flammability limits in mixtures of flammable gas (methane, hydrogen) – nitrous oxide – fluorinated hydrocarbons (trifluoromethane CHF_3 , pentafluoroethane C_2HF_5 , perfluorobutane C_4F_{10}) was carried out. Very low values of lower flammability limits of the flammable gases were revealed which are substantially lower than those in air. The upper flammability limits are remarkably higher than those in air. Compositions of mixtures in peak points of flammability curves are characterized by very low values of a fuel equivalence ratio φ (in the most cases $\varphi < 0.1$), but in the case of air or oxygen-nitrogen oxidizer with $[O_2] = 25\%$ (vol.) the φ values usually exceeds 0.5. It was found that the concentrations of the fluorinated hydrocarbons in the peak points of the flammability curves are quite similar for hydrogen and methane despite of big difference in these values for combustion in air. A qualitative interpretation of the obtained results is given in the article.

Keywords: nitrous oxide, flammability limits, fluorinated hydrocarbons, hydrogen, methane

For citation: Shebeko, A.Yu., Shebeko, Yu.N. & Zuban, A.V. (2023) Influence on fluorocarbons flammability limits in the mixtures of H_2-N_2O and CH_4-N_2O . *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 34–42. doi: 10.17223/7783494/1/6 (In Russian).

Введение

Закись азота N_2O является активным окислителем, способным образовывать взрывоопасные смеси с горючими газами и парами, в связи с чем возника-

ет проблема оценки концентрационных пределов распространения пламени для таких смесей. В то же время данные по указанным показателям зачастую неполны.

В работе [1] определены концентрационные пределы распространения пламени в смесях бутана, оксида углерода, циклогексана и ксилола с закисью азота при флегматизации азотом в стеклянной колбе объемом 0,5 дм³. Реактор нагревался до температуры 45 °С для достижения требуемого давления паров горючих жидкостей. Горение инициировали искрой в нижней части реактора. Флегматизирующие концентрации азота достигали 80% (об.). Нижние концентрационные пределы распространения пламени (НКПР) указанных выше горючих веществ имеют весьма низкие значения и составляют для циклогексана 0,33% (об.), оксида углерода – 4,5% (об.), бутана – 0,17% (об.), ксилола – 0,19% (об.). Для сравнения величины НКПР указанных веществ при горении в воздухе составляют 1,3; 12,5; 1,8 и 1,1% (об.) соответственно [2]. По оценкам авторов [1], проведенным без учета экзотермического распада N₂O, адиабатический прирост температуры при сгорании указанных выше предельных смесей составляет около 400 °С. Недостающее для горения тепло, по их мнению, выделяется при экзотермическом распаде закиси азота. Качественно близкие результаты экспериментально получены в работе [3], в которой опыты проводили в сферическом сосуде объемом 6 дм³ и цилиндрическом сосуде диаметром 40 и высотой 160 мм с обогревом стенок до 100 °С. Изучали горение составов циклогексан – окись азота – закись азота – азот.

В работе [4] показано, что НКПР циклопропана C₃H₆ в закиси азота N₂O составляет около 1,3% (об.), в то время как эта же величина для случая горения в воздухе находится вблизи 2,3% (об.). В то же время минимальное взрывоопасное содержание N₂O в точке флегматизации азотом (мыс полуострова распространения пламени в смесях C₃H₆–N₂O–N₂) почти в 2 раза превышает аналогичную величину для кислорода при горении в воздухе. Величины нижних и верхних концентрационных пределов распространения пламени водорода при горении в N₂O составляют 3,0 и 84,0% (об.) соответственно.

Концентрационные пределы распространения пламени в смесях горючее (пропан, изобутан) – закись азота – разбавитель (азот, диоксид углерода, галогенуглеводороды) определены в работе [5]. Обнаружено существенное снижение нижнего концентрационного предела распространения пламени пропана при добавлении в смесь небольших количеств (несколько % (об.)) 1,2-дибромтетрафторэтана C₂F₄Br₂, одного из наиболее сильных ингибиторов горения органических соединений в воздухе.

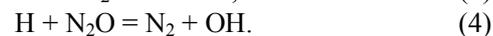
В работах [6, 7] обстоятельно изучены пределы самовоспламенения смесей водорода, аммиака, оксида углерода, метана и этана с закисью азота. Проанализированы кинетические механизмы реакций

при самовоспламенении указанных выше смесей. Найдено, что добавки окиси азота оказывают сильное ингибирующее влияние на воспламенение смеси H₂ – N₂O, в то время как добавки кислорода в малых концентрациях промотируют воспламенение указанных смесей. Отмечено, что химическое превращение в системе CO – N₂O в присутствии водородсодержащих примесей носит характер цепного процесса. Изучено влияние промотирующих и ингибирующих добавок на задержку воспламенения.

Из других исследований характеристик горения горючих газов в закиси азота и других окислах азота следует отметить работы [8–16]. В статье [15] отмечено, что в бедном пламени H₂ – N₂O имеются высокотемпературная и низкотемпературная зоны. В высокотемпературной зоне реализуется мономолекулярный распад молекул N₂O с образованием O, N₂, O₂, NO. Атомы O и молекулы O₂ диффундируют в низкотемпературную зону пламени, инициируя реакции разветвления и продолжения цепей. Разветвление осуществляется в процессе



продолжение цепей – в реакциях



При этом отмечена важная роль реакции (4). В работе [15] указывается, что НВг оказывает ингибирующее влияние на горение водорода в смеси N₂ и N₂O ([N₂] : [N₂O] = 1 : 1), которое, однако, значительно ниже, чем при горении в воздухе. Авторы [15] объясняют это более низкими концентрациями радикала HO₂ в пламенах, в которых окислителем является закись азота.

Из проведенного выше анализа следует, что имеющиеся в литературе данные по концентрационным пределам распространения пламени в смесях, в которых окислителем является закись азота, достаточно немногочисленны. Фторированные углеводороды широко используются для пожаротушения и взрывопредупреждения. Создан нормативный документ СП 485.1311500.2020 «Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования». Однако работы по оценке их эффективности выполнены только для окислительных сред, представляющих собой смеси азота и кислорода (см., например, работы [17, 18], в которых выполнен анализ исследований в этой области). В связи с этим настоящая работа посвящена экспериментальному определению концентрационных пределов распространения пламени в смесях вида горючее (метан, водород) – закись азота – фторированные углеводороды. Выбор для исследования фто-

рированных углеводородов вызван широким применением этих веществ как средств пожаротушения и взрывопреждения, безопасных с точки зрения разрушения озонового слоя атмосферы.

Методика эксперимента

Опыты проводили на установке «Вариант», описанной ранее [19, 20]. Данная установка и методика работы на ней соответствуют требованиям стандарта ГОСТ 12.1.044-2018 «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения». Данный стандарт соответствует общепринятым международным стандартам EN 1839 (2017) «Determination of the explosion limits and the limiting oxygen concentration (LOC) for flammable gases and vapors» и ASTM E681-09 (2015) «Standard test method for concentration limits of flammability of chemicals (vapors and gases)». Основу ее составляет реакционный сосуд сферической формы из нержавеющей стали объемом 4,2 дм³ (внутренний диаметр 20 см). Установка включает в себя также систему газоприготовления, обеспечивающую вакуумирование реакционного сосуда и подачу в него отдельных компонентов газовой смеси. Зажигание газовых смесей осуществляли электрической искрой с энергией около 2 Дж в центре реакционного сосуда. В качестве горючих газов использовали водород и метан, окислителя – закись азота, флегматизаторов – трифторметан CHF₃, пентафторэтан C₂HF₅ и перфторбутан C₄F₁₀. Смеси готовили непосредственно в реакторе по парциальным давлениям следующим образом. В вакуумированный до остаточного давления не выше 0,5 кПа реакционный сосуд напускали требуемые количества газов до атмосферного давления и затем смесь оставляли в покое в течение времени не менее 5 мин, что, как было показано ранее [19, 20], является достаточным для качественного перемешивания. Давление в

реакционном сосуде в процессе распространения пламени регистрировали датчиком давления с постоянной времени 10⁻³ с. Сигнал с датчика подавали на аналогоцифровой преобразователь и далее на компьютер. Опыты проводили при комнатной температуре и атмосферном давлении. Принимали, что имеет место распространение пламени, если максимальное регистрируемое давление в реакционном сосуде после зажигания превышает 50 кПа. Для каждого значения предела проводили не менее 6 опытов. В соответствии с ГОСТ 12.1.044-2018 сходимости и воспроизводимости метода определения пределов составляют 0,5 и 1,0 % (об.) соответственно.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты определения концентрационных пределов распространения пламени в смесях метан – закись азота – трифторметан. Видно, что флегматизатор слабо влияет на нижний предел, верхний же предел достаточно равномерно снижается с увеличением содержания CHF₃. При этом флегматизирующая концентрация трифторметана существенно превышает соответствующее его содержание в точке флегматизации смеси CH₄ – (N₂ – O₂) – CHF₃ при концентрации кислорода в азотокислородной окислительной среде 25% (об.) [21]. На рис. 1 пунктиром представлена линия, отвечающая составам, стехиометрическим в отношении протекания реакции



т.е. смесям в точке флегматизации отвечают бедные составы.

На рис. 2, 3 приведены результаты определения концентрационных пределов распространения пламени в смесях CH₄ – N₂O – фторированный флегматизатор и H₂ – N₂O – фторированный флегматизатор.

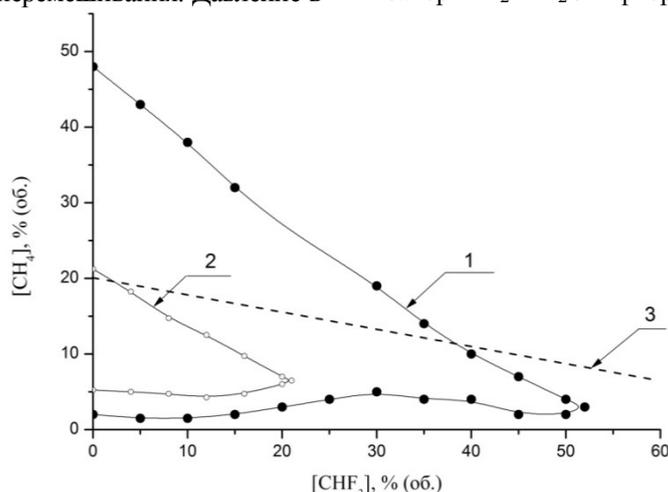


Рис. 1. Концентрационные пределы распространения пламени в смесях CH₄ – N₂O – CHF₃ (1) и CH₄ – (25% O₂ – 75% N₂) – CHF₃ (2) (по данным [19]). Прямая (3) отвечает стехиометрическим смесям

Fig. 1. Flammability limits in mixtures of CH₄ – N₂O – CHF₃ (1) and CH₄ – (25% O₂ + 75% N₂) – CHF₃ (2) (on the data [19]). Straight line (3) corresponds to stoichiometric mixtures

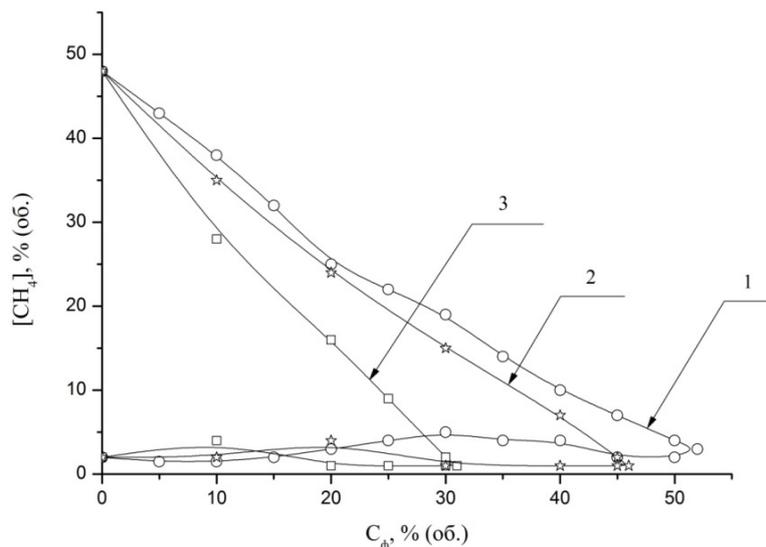


Рис. 2. Концентрационные пределы распространения пламени в смесях $\text{CH}_4 - \text{N}_2\text{O}$ – фторированный флегматизатор: 1 – CHF_3 , 2 – C_2HF_5 , 3 – C_4F_{10} . C_ϕ – концентрация флегматизатора

Fig. 2. The flammability limits in mixtures $\text{CH}_4 - \text{N}_2\text{O}$ -fluorinated hydrocarbons: 1 – CHF_3 ; 2 – C_2HF_5 ; 3 – C_4F_{10} . C_d is a diluents concentration

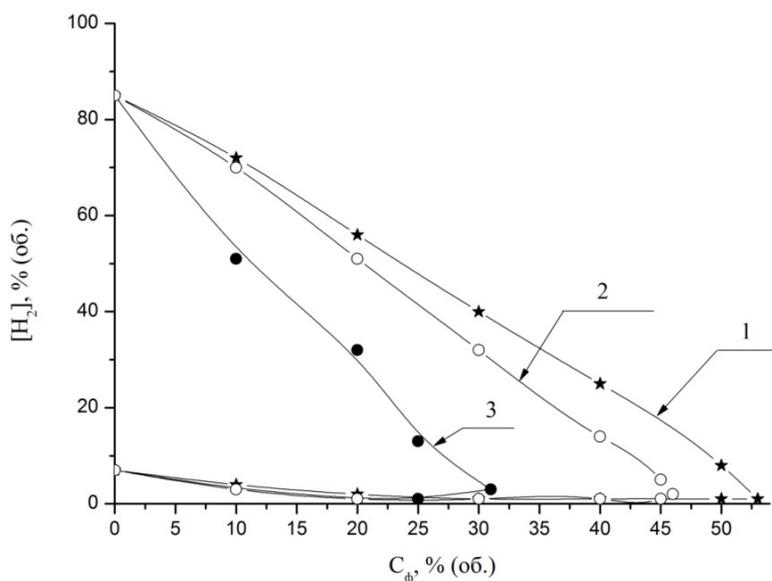


Рис. 3. Концентрационные пределы распространения пламени в смесях $\text{H}_2 - \text{N}_2\text{O}$ – фторированный флегматизатор: 1 – CHF_3 , 2 – C_2HF_5 , 3 – C_4F_{10} . C_ϕ – концентрация флегматизатора

Fig. 3. The flammability limits in mixtures $\text{H}_2 - \text{N}_2\text{O}$ -fluorinated hydrocarbons: 1 – CHF_3 ; 2 – C_2HF_5 ; 3 – C_4F_{10} . C_d is a diluents concentration

Обращает на себя внимание существенно более низкое (по сравнению с горением в воздухе) значение нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) – (2% (об.) по сравнению с 5% (об.)). Аналогичным образом величина верхнего концентрационного предела распространения пламени (ВКПР) оказывается существенно выше, чем для случая горения в воздухе (48% (об.) по сравнению с 15% (об.)). Данный результат согласу-

ется с экспериментальными данными [1, 3], относящимися к горению различных углеводородов в заки- си азота, где также отмечены существенно более низкие величины НКПР и более высокие значения ВКПР по сравнению с горением в воздухе.

В табл. 1 представлены результаты эксперимен- тального определения составов газовых смесей в точках флегматизации (точка флегматизации отвечает мысу полуострова воспламенения). Здесь же

представлены результаты расчета коэффициента избытка горючего ϕ для указанных составов, выполненного по формуле

$$\phi = (C_r^0 / C_{ок}^0) / (C_r / C_{ок})_{стех},$$

где $(C_r^0 / C_{ок}^0)$ – значения концентраций горючего и окислителя в точках флегматизации, % (об.); $(C_r / C_{ок})_{стех}$ – отношение концентраций горючего C_r и окислителя $C_{ок}$ в стехиометрической смеси.

Для горения метана в закиси азота стехиометрическая смесь соответствует протеканию реакции (5), для водорода – реакции



В табл. 2 для сравнения приведены аналогичные данные для случаев горения метана [21, 22] и водорода [23, 24] в окислительной среде, представляющей собой смесь азота и кислорода с содержанием O_2 25% (об.).

Таблица 1
Составы смесей горючий газ (CH_4, H_2) – закись азота – фторированный углеводород ($CHF_3, C_2HF_5, C_4F_{10}$) в точках флегматизации

Горючий газ	Флегматизатор	Концентрации компонентов, % (об.)			Коэффициент избытка горючего ϕ
		Горючий газ	Флегматизатор	Окислитель	
CH_4	CHF_3	3,0	52,0	45,0	0,27
	C_2HF_5	1,0	46,0	53,0	0,075
	C_4F_{10}	1,0	30,0	69,0	0,058
H_2	CHF_3	1,0	53,0	46,0	0,022
	C_2HF_5	2,0	46,0	52,0	0,038
	C_4F_{10}	3,0	31,0	66,0	0,045

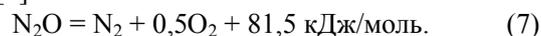
Таблица 2
Составы смесей горючий газ (CH_4, H_2) – окислитель (25% $O_2 + 75\% N_2$) – фторированный углеводород ($CHF_3, C_2HF_5, C_4F_{10}$) в точках флегматизации

Горючий газ	Флегматизатор	Концентрации компонентов, % (об.)			Коэффициент избытка горючего ϕ
		Горючий газ	Флегматизатор	Окислитель	
CH_4	CHF_3	6,8	21,0	72,2	0,75
	C_2HF_5	6,0	20,0	74,0	0,65
	C_4F_{10}	8,0	12,7	79,3	0,81
H_2	CHF_3	15,0	25,5	59,5	0,50
	C_2HF_5	12,5	42,5	45,0	0,55
	C_4F_{10}	12,0	22,0	66,0	0,36

Из табл. 1, 2 видно, что значения коэффициента избытка горючего ϕ заметно более низкие при горении в закиси азота по сравнению со случаем горения в окислительной среде с содержанием O_2 до 25% (об.). Кроме того, минимальные флегматизирующие концентрации каждого из фторированных углеводородов при горении метана и водорода в закиси азота достаточно близки друг к другу, несмотря на то, что концентрационные области распространения пламени в смесях $CH_4 - N_2O$ и $H_2 - N_2O$ (без флегматизаторов) существенно различаются (в случае водорода указанная концентрационная область оказывается значительно шире) (см. рис. 2, 3). В то же время флегматизирующие концентрации фторированных углеводородов при горении водорода и метана в окислительной среде с содержанием кислорода 25% (об.) различаются существенно. Окислительная среда, содержащая 25% (об.) O_2 , выбрана для сравнения в силу того, что в ней относительное содержание атомов кислорода (25%) выше, чем в воздухе, и при-

ближается к аналогичной величине для закиси азота (33%). Данными для горения в окислительной среде $N_2 - O_2$, содержащей 33% (об.) кислорода, авторы не располагают, поэтому сравнение делается со случаем содержания кислорода в окислительной среде 25% (об.). Следует при этом отметить, что при содержании O_2 менее 25% (об.) результаты качественно аналогичны отмеченным выше для азотокислородной среды [21–23].

Низкие значения концентраций горючих газов на нижних ветвях кривых флегматизации (см. рис. 1–3) могут быть качественно объяснены, на наш взгляд, протеканием экзотермического мономолекулярного распада закиси азота, наиболее существенного для бедных смесей и способного протекать во взрывном режиме [6]:



Для подтверждения важной роли мономолекулярного распада закиси азота при распространении пламени был проведен термодинамический

расчет состава продуктов сгорания на примере смесей $\text{CH}_4 - \text{N}_2\text{O} - \text{CHF}_3$, близких по составу к нижнему и верхнему концентрационным пределам распространения пламени при соответствующих содержаниях трифторметана. Результаты представлены в табл. 3. Помимо указанных в табл. 3 соединений в расчетах учитывали также такие продукты сгорания, как F_2 , CF_3 , CF_2 , CF , CHF , CHF_2 , CH_4 , CHF_3 , CF_4 , однако их равновесные концентрации оказались очень низкими, поэтому в табл. 3 они не приведены.

Как следует из данных, представленных в табл. 3, даже при горении бедных смесей в равновесном со-

ставе продуктов сгорания исходный окислитель (закись азота) практически отсутствует, что свидетельствует о важности процесса экзотермического распада закиси азота. Об этом же свидетельствуют результаты термодинамического расчета адиабатической температуры горения $T_{\text{ад}}$ для нижней ветви кривой флегматизации, которая находится в диапазоне от 1 800 до 2 200 К в зависимости от содержания флегматизатора (рис. 4). Здесь уместно отметить, что при сгорании бедной околопредельной смеси метана с воздухом, содержащей 5% (об.) CH_4 (а не 2% (об.), как в случае с закисью азота), величина $T_{\text{ад}}$ составляет около 1 500 К.

Таблица 3

Результаты расчетов равновесного состава продуктов сгорания смесей $\text{CH}_4 - \text{N}_2\text{O} - \text{CHF}_3$

Состав исходной смеси, % (об.)			Состав продуктов сгорания, % (об.)											
CH_4	N_2O	CHF_3	N_2	O_2	H_2O	CO_2	NO	COF_2	H_2	CO	F	H	O	N_2O
2,0	98,0	0	65,1	29,6	26,8	13,3	1,2	0	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-3}$	0	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$9,7 \cdot 10^{-2}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$
47,0	53,0	0	27,3	$<10^{-8}$	2,6	0,5	$2,5 \cdot 10^{-8}$	0	45,9	23,7	0	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$7,9 \cdot 10^{-11}$	$9,1 \cdot 10^{-13}$
4,0	71,0	25,0	46,6	6,2	13,5	1,6	0,2	17,5	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	14,4	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$
15,0	60,0	25,0	39,2	$<10^{-8}$	12,6	0,8	$9,6 \cdot 10^{-4}$	20,4	14,8	4,6	7,1	0,14	$9,6 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-8}$

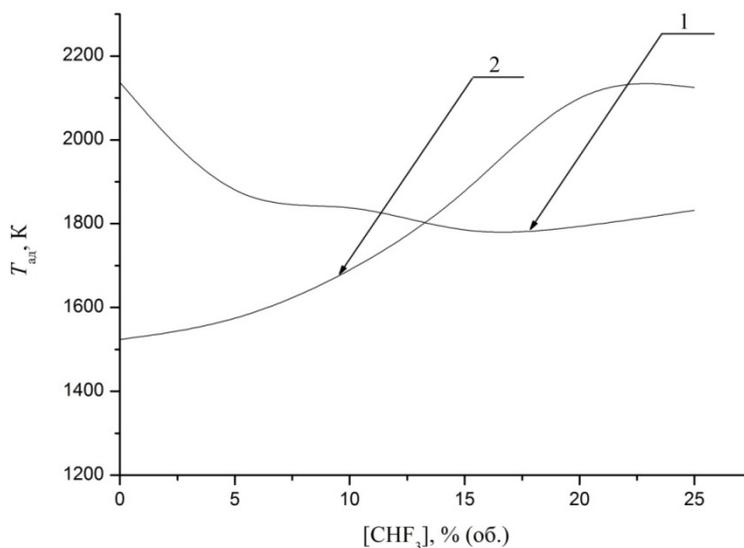
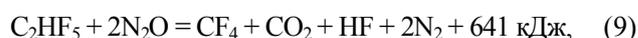


Рис. 4. Зависимость адиабатической температуры горения $T_{\text{ад}}$ околопредельных смесей $\text{CH}_4 - \text{N}_2\text{O} - \text{CHF}_3$ от содержания трифторметана для нижней (1) и верхней (2) ветвей кривой флегматизации

Fig. 4. Dependence of the adiabatic flame temperature $T_{\text{ад}}$ for the near-limit mixtures corresponding to the lower (1) and upper (2) branches of the flammability curve on the trifluoromethane content in the mixtures of $\text{CH}_4 - \text{N}_2\text{O} - \text{CHF}_3$

Кривые флегматизации фторированными углеводородами при горении в закиси азота характеризуются значительным снижением концентрации горючего газа с ростом содержания флегматизатора до величин, существенно меньших НКПР смесей без флегматизатора (см. рис. 1–3). Тем самым наблюдается промотирующее действие фторированных углеводородов по отношению к бедным смесям горючий

газ (CH_4 , H_2) – закись азота. Одним из возможных объяснений этого эффекта может быть протекание следующих экзотермических процессов с участием фторированных углеводородов:



Безусловно, превращение фторированных углеводородов во фронте пламени является сложным процессом, включающим в себя множество элементарных реакций, тем не менее реакции (8)–(10) демонстрируют возможность существенного тепловыделения в процессах с участием фторированных углеводородов и закиси азота.

Согласно данным, приведенным в табл. 1, коэффициенты избытка горючего в этих точках имеют очень низкие значения. Одним из возможных объяснений данной особенности может быть предположение о том, что реализуются процессы горения смесей фторированных углеводородов с закисью азота, в которых фторированные углеводороды являются горючими веществами. Однако горение этих смесей невозможно без небольших добавок газов, в состав молекул которых входят атомы водорода, подобно тому, как горение оксида углерода также невозможно без указанных добавок (см., например, [25]). Наличие водородсодержащих добавок необходимо для реализации процессов (1)–(4), обуславливающих разветвление и продолжение цепей в соответствии с представлениями работы [14] о механизме распространения пламени в смесях, окислителем в которых является закись азота.

Достаточно большие значения тепловых эффектов реакций фторированных углеводородов с закисью азота (реакции (8)–(10)) даже при малых содержаниях водорода и метана на нижних ветвях кривых флегматизации обуславливают адиабатиче-

ские температуры, типичные для горения органических соединений в воздухе (см. рис. 4).

Выводы

Экспериментально определены концентрационные пределы распространения пламени в смесях горючий газ (метан, водород) – закись азота – фторированный углеводород (трифторметан, пентафторэтан, перфторбутан). Обнаружены существенно более низкие по сравнению с горением в воздухе значения нижних концентрационных пределов распространения пламени и заметно более высокие величины верхних концентрационных пределов. Составы смесей в точках флегматизации характеризуются очень низкими значениями коэффициента избытка горючего ϕ (в большинстве случаев $\phi < 0,1$), в то время как для случая горения в воздухе и азото-кислородной окислительной среде с содержанием O_2 25% (об.) величины ϕ , как правило, превышают 0,5. Установлено, что флегматизирующие концентрации фторированных углеводородов при горении метана и водорода в закиси азота очень близки друг к другу в отличие от горения в окислительных средах, состоящих из азота и кислорода. Отмечено, что эффективность фторированных углеводородов при горении в закиси азота значительно ниже, чем в случае горения в азотокислородной окислительной среде с концентрацией O_2 до 25% (об.). Данный результат следует учитывать при проектировании систем пожаротушения и взрывопреупреждения в случае технологических сред с наличием закиси азота.

Список источников

1. Брандт Б.Б., Матов Л.А., Розловский А.И., Хайлов В.С. Взрывоопасность смесей окислов азота с горючими газами и парами // Химическая промышленность. 1960. № 5. С. 419–425.
2. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник / под ред. А.Н. Баратова и А.Я. Корольченко. М.: Химия, 1990. Т. 1, 2.
3. Брандт Б.Б., Розловский А.И., Стрижевский И.И., Хайлов В.С. Взрывоопасность смесей окислов азота с горючими газами и парами // Химическая промышленность. 1965. № 4. С. 279–284.
4. Zabetakis M.G. Flammability characteristics of combustible gases and vapors // Bulletin 627. Bureau of Mines. 1965. 121 p.
5. Шебеко Ю.Н., Корольченко А.Я., Ильин А.Б., Малкин В.Л. Концентрационные пределы распространения пламени в смесях горючее–разбавитель–закись азота // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 3. С. 48–51.
6. Скачков Г.И. Кинетическое моделирование непротитированного и протитированного воспламенения горючих газов: дис. ... д-ра хим. наук. М.: Институт химической физики АН СССР, 1984. 316 с.
7. Борисов А.А., Заманский В.М., Скачков Г.И. Кинетика и механизм взаимодействия водорода с закисью азота // Кинетика и катализ. 1978. Т. 19, № 1. С. 38–46.
8. Бунев В.А. О механизме протитирования и ингибирования окисления богатых воздушных смесей водорода оксидами азота NO и NO_2 при адиабатическом самовоспламенении // Физика горения и взрыва. 2011. Т. 47, № 1. С. 22–29.
9. Koshiya Y., Takigawa T., Matsuoka Y., Ohtani H. Explosion characteristics of flammable organic vapors in nitrous oxide atmosphere // Journal of Hazardous Materials. 2010. V. 183 (1–3). P. 746.
10. Mevel R., Lafosse F., Chaumeix N., Dupre G., Paillard C.E. Spherical expanding flames in H_2-N_2O-Ar mixtures: flame speed measurements and kinetic modeling // International Journal of Hydrogen Energy. 2009. V. 34 (21). P. 9007.
11. Dean A.M., Johnson R.L. Shock tube studies of the $N_2O/CH_4/CO/Ar$ and $N_2O/C_2H_6/CO/Ar$ systems // Combustion and Flame. 1980. V. 37 (2). P. 109–123.
12. Smith M.Y. The effect of nitric oxide on the recombination of H atoms in fuel-rich propane – oxygen – nitrogen flames // Combustion and Flame. 1972. V. 18 (2). P. 293–295.
13. Mainiero R.J., Vanpee M. Reaction mechanisms in hydrogen-nitric oxide flames // Combustion Science and Technology. 1980. V. 22 (3/4). P. 171–183.

14. Balakhnine V.P., Vandooren J., Van Tiggelen P.J. Reaction mechanism and rate constants in lean hydrogen-nitrous oxide flames // *Combustion and Flame*. 1977. V. 28 (2). P. 165–173.
15. Day M.J., Stamp D.V., Thompson K., Dixon-Lewis G. Inhibition of hydrogen-air and hydrogen-nitrous oxide flames by halogen compounds // *Proceedings of the 13th Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh : The Combustion Institute, 1971. P. 705–712.
16. Лорджипанидзе Д.Н., Азатян В.В., Дзюценидзе З.Г., Мусеридзе М.Д. Влияние двуокиси азота на первый предел воспламенения водородно-кислородных смесей // *Физика горения и взрыва*. 1979. Т. 15, № 1. С. 73.
17. Шебеко А.Ю., Шебеко Ю.Н., Голов Н.В., Зубань А.В., Азатян В.В. Влияние содержания кислорода в окислительной среде на горение околостехиометрических смесей вида горючее – окислительная среда – фторированный углеводород // *Химическая физика*. 2016. Т. 35, № 11. С. 62–67.
18. Shebeko A.Yu., Shebeko Yu.N., Golov N.V., Zuban A.V., Yarkin A.A. Characteristics of a combustion of near stoichiometric gaseous mixtures of flammable gas – Oxidizer – Fluorinated hydrocarbon at various oxygen concentrations in the oxidizer // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017. V. 46. P. 195–199.
19. Шебеко Ю.Н., Корольченко А.Я., Цариченко С.Г. и др. Влияние начального давления и температуры на характеристики горения водородсодержащих смесей // *Физика горения и взрыва*. 1989. Т. 25, № 1. С. 32.
20. Shebeko Yu.N., Tsarichenko S.G., Korolchenko A.Ya. Burning velocities and flammability limits of gaseous mixtures at elevated temperatures and pressures // *Combustion and Flame*. 1995. V. 102 (4). P. 427–437.
21. Азатян В.В., Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Навценя В.Ю. О промотировании и ингибировании фторированными углеводородами горения метана в окислительных средах с различным содержанием кислорода // *Химическая физика*. 2010. Т. 29, № 9. С. 42–51.
22. Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Azatyan V.V., Navzenya V.Yu. On Inhibition and Promotion of Methane Combustion by Fluorinated Hydrocarbons in Oxidizers with Different Oxygen Content // *Proceedings of the 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. University of Leeds, 2010. P. 621.
23. Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Навценя В.Ю., Томилин А.В., Азатян В.В. Влияние содержания кислорода в окислительной среде на эффективность ингибирования горения водорода // *Пожарная безопасность*. 2006. № 4. С. 65.
24. Azatyan V.V., Shebeko Yu.N., Shebeko A.Yu., Navzenya V.Yu., Tomilin A.V. An influence of oxygen content in an oxidizing atmosphere on inhibitive action of fluorinated agents on a hydrogen flame // *Proceedings of the 6th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions*. V. 2. Halifax : Dalhousie University, 2006. P. 418.
25. Зельдович Я.Б., Воеводский В.В. Тепловой взрыв и распространение пламени в газах. Алма-Ата : Казахский университет, 2004. 210 с.

References

1. Brandt, B.B., Matov, L.A., Rozlovskiy, A.I. & Khaylov, V.S. (1960) Vzryvoopasnost smesey okislov azota s goryuchimi gazami i parami [Explosion hazard of mixtures of nitric oxides with flammable gases and vapors]. *Khimicheskaya promyshlennost – Chemical industry*. 5. pp. 419–425.
2. Baratov, A.N. & Korolchenko, A.Ya. (Eds.) (1990) *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov i sredstva ikh tusheniya* [Fire hazard of substances and materials and tools for their fire extinguishing]. Reference book. Moscow, Khimia, 1990. Vol. 1, 2
3. Brandt, B.B., Rozlovskiy, A.I., Strizhevskiy, I.I. & Khaylov, V.S. (1965) Vzryvoopasnost smesey okislov azota s goryuchimi gazami i parami [Explosion hazard of mixtures of nitric oxides with flammable gases and vapors]. *Khimicheskaya promyshlennost – Chemical industry*. 4. pp. 279–284.
4. Zabetakis, M.G. (1965) Flammability characteristics of combustible gases and vapors. *Bulletin 627. Bureau of Mines*.
5. Shebeko, Yu.N., Korolchenko, A.Ya., Ilin, A.B. & Malkin, V.L. (1988) Kонтсentratsionnye predelyrasprostraneniya plameni v smesyakh goryuchee-razbavitel-zakis azota [Flammability limits in mixtures of fuel – diluent – nitrous oxide]. *Fizika gorennya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 24(3). pp. 48–51.
6. Skachkov, G.I. (2004) *Kinetical modeling of ignition of flammable gases*. Doctor of technical sciences thesis. Moscow.
7. Borisov, A.A., Zamansky, V.M. & Skachkov, G.I. (1978) Kinetika i mekhanizm vzaimodeystviya vodoroda s zakisyu azota [Kinetics and mechanism of interaction of hydrogen and nitrous oxide]. *Kinetika i kataliz – Kinetics and Catalysis*. 19(1). pp. 38–46.
8. Bunev, V.A. (2011) O mekhanizme promotirovaniya i ingibirovaniya okisleniya bogatykh vozdushnykh smesey vodoroda oksidami azota NO i NO2 pri adiabaticheskom samovosplamenenii [On the mechanism of promotion and inhibition of oxidation of rich air mixtures of hydrogen by nitrogen oxides NO and NO2 during adiabatic self-ignition]. *Fizika gorennya i vzryva – Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 47(1). pp. 22–29.
9. Koshiya, Y., Takigawa, T., Matsuoka, Y. & Ohtani, H. (2010) Explosion characteristics of flammable organic vapors in nitrous oxide atmosphere. *Journal of Hazardous Materials*. 183(1-3). P. 746.
10. Mevel, R., Lafosse, F., Chaumeix, N., Dupre, G. & Paillard, C.E. (2009) Spherical expanding flames in H₂-N₂O-Ar mixtures: flame speed measurements and kinetic modeling. *International Journal of Hydrogen Energy*. 34(21). P. 9007.
11. Dean, A.M. & Johnson, R.L. (1980) Shock tube studies of the N₂O/CH₄/CO/Ar and N₂O/C₂H₆/CO/Ar systems. *Combustion and Flame*. 37(2). pp. 109–123.
12. Smith, M.Y. (1972) The effect of nitric oxide on the recombination of H atoms in fuel- rich propane – oxygen – nitrogen flames. *Combustion and Flame*. 18(2). pp. 293–295.
13. Mainiero, R.J. & Vanpee, M. (1980) Reaction mechanisms in hydrogen-nitric oxide flames. *Combustion Science and Technology*. 22(3/4). pp. 171–183.
14. Balakhnine, V.P., Vandooren, J. & Van Tiggelen, P.J. (1977) Reaction mechanism and rate constants in lean hydrogen-nitrous oxide flames. *Combustion and Flame*. 28(2). pp. 165–173.
15. Day, M.J., Stamp, D.V., Thompson, K. & Dixon-Lewis, G. (1971) Inhibition of hydrogen-air and hydrogen-nitrous oxide flames by halogen compounds. In: *Proceedings of the 13th Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh, The Combustion Institute. pp. 705–712.

16. Lordkipanidze, D.N., Azatyan, V.V., Dzotsenidze, Z.G. & Museridze, M.D. (1979) Vliyanie dvoxkisi azota na pervyy predel vosplamneniivodorodno-kislorodnykh smesey [The effect of nitrogen dioxide on the first limit of ignition of hydrogen-oxygen mixtures]. *Fizika goreniya i vzryva - Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 15(1). P. 73.
17. Shebeko, A.Yu., Shebeko, Yu.N., Golov, N.V., Zuban, A.V. & Azatyan, V.V. (2016) Vliyanie sodержaniya kisloroda v okislitelnoy srede na gorenie okolostekhiometricheskikh smesey vida goryuchee – okislitel'naya sreda – ftorirovanny uglevodorod [The effect of oxygen content in the oxidizing medium on the combustion of near-stoichiometric mixtures of the type fuel – oxidizing medium - fluorinated hydrocarbon combustion]. *Khimicheskaya fizika – Russian Journal of Physical Chemistry*. 35(11). pp. 62 – 67.
18. Shebeko, A.Yu., Shebeko, Yu.N., Golov, N.V., Zuban, A.V. & Yarkin, A.A. (2017) Characteristics of a combustion of near stoichiometric gaseous mixtures of flammable gas - Oxidizer - Fluorinated hydrocarbon at various oxygen concentrations in the oxidizer. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 46. pp. 195–199.
19. Shebeko, Yu.N., Korolchenko, A.Ya. & Tsarichenko, S.G. (1989) Vliyanie nachalnogo davleniya i temperatury na kharakteristiki goreniya vodorodsoderzhashchikh smesey [An influence of an initial pressure and temperature on combustion characteristics of gaseous mixtures]. *Fizika goreniya i vzryva - Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 25(1). pp. 32–36.
20. Shebeko, Yu.N., Tsarichenko, S.G. & Korolchenko, A.Ya. (1995) Burning velocities and flammability limits of gaseous mixtures at elevated temperatures and pressures. *Combustion and Flame*. 102(4). pp. 427–437.
21. Azatyan, V.V., Shebeko, Yu.N., Shebeko, A.Yu. & Navtsenya, V.Yu. (2010) O promotirovani i ingibirovani ftorirovannyimi uglevodorodami goreniya metana v okislitelnykh sredakh s razlichnym sodержaniem kisloroda [On the promotion and inhibition of methane combustion by fluorinated hydrocarbons in oxidizing media with different oxygen content] *Khimicheskaya fizika – Russian Journal of Physical Chemistry*. 29(9). pp. 42–51.
22. Shebeko, Yu.N., Shebeko, A.Yu., Azatyan, V.V. & Navzenya, V.Yu. (2010) On Inhibition and Promotion of Methane Combustion by Fluorinated Hydrocarbons in Oxidizers with Different Oxygen Content. In: *Proceedings of the 6th International Seminar on Fire and Explosion Hazards*. University of Leeds.
23. Shebeko, Yu.N., Shebeko, A.Yu., Navtsenya, V.Yu., Tomilin, A.V. & Azatyan, V.V. (2006) Vliyanie sodержaniya kisloroda v okislitelnoy srede na effektivnost ingibirovaniya goreniya vodoroda [Influence of oxygen content in the oxidizing medium on the efficiency of inhibition of hydrogen combustion]. *Pozharnaya bezopasnost – Fire Safety*. 4. P. 65.
24. Azatyan, V.V., Shebeko, Yu.N., Shebeko, A.Yu., Navzenya, V.Yu. & Tomilin, A.V. (2006) An influence of oxygen content in an oxidizing atmosphere on inhibitive action of fluorinated agents on a hydrogen flame. In: *Proceedings of the 6th International Symposium on Hazards, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions. Vol. 2*. Halifax : Dalhouse University.
25. Zeldovich, Ya.B. & Voevodskiy, V.V. (2004) *Teplovoy vzryv i rasprostranenie plameni v gazakh*. [Thermal explosion and a flame propagation in gases]. Alma-Ata.

Информация об авторах:

Шебеко Алексей Юрьевич – доктор технических наук, начальник отдела Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (Балашиха, Россия). E-mail: ay_shebeko@mail.ru; Researcher ID: G-1975-2016; Author ID: 14627996600; ORCID: 0000-0002-5771-2127.

Шебеко Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (Балашиха, Россия). E-mail: yn_shebeko@mail.ru; Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547.

Зубань Андрей Владимирович – кандидат технических наук, начальник отдела Всероссийского научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России (Балашиха, Россия). E-mail: avzuban@mail.ru; Researcher ID: AAB-9575-2019; Author ID: 55847911600; ORCID: 0000-0002-7799-2058.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Shebeko Aleksey Yu., Dr.Sc. (Engineering), head of department, All Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Balashikha, Russian Federation). E-mail: ay_shebeko@mail.ru; Researcher ID: G-1975-2016; Author ID: 14627996600; ORCID: 0000-0002-5771-2127.

Shebeko Yury N., Dr.Sc. (Engineering), professor, chief researcher, All Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Balashikha, Russian Federation). E-mail: yn_shebeko@mail.ru; Author ID: 7006511704; ORCID: 0000-0003-1916-2547.

Zuban Andrey V., Cand.Sc. (Engineering), head of department, All Russian Research Institute for Fire Protection of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters (Balashikha, Russian Federation). E-mail: avzuban@mail.ru; Researcher ID: AAB-9575-2019; Author ID: 55847911600; ORCID: 0000-0002-7799-2058.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023

Научная статья
УДК 621.371
doi: 10.17223/7783494/1/7

Радиоволновая бесконтактная система досмотра пассажиров

Павел Валерьевич Смокотин¹, Сергей Эдуардович Шипилов², Раиль Наилевич Сатаров³,
Иван Юрьевич Кузьменко⁴, Тимур Рамильевич Муксунوف⁵, Иван Сергеевич Федянин⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *ckpelectronics@gmail.com*

² *s.shipilov@gmail.com*

³ *satarov.rail@gmail.com*

⁴ *kuzmenko.ivan.yu@gmail.com*

⁵ *t0snake0mr@ya.ru*

⁶ *vanyaff@sibmail.com*

Аннотация. Разработан прототип радиоволновой бесконтактной системы досмотра на основе механически перемещаемой многоэлементной антенной решетки с приемопередающими модулями на частоте 24 ГГц. Данная система позволяет проводить зондирование человека менее чем за 3 с. По результатам зондирования на основе принципа синтеза апертуры рассчитывается радиоизображение человека с разрешающей способностью порядка 1 см. Полученные радиоизображения могут использоваться для обнаружения и распознавания скрытых под одеждой на теле человека предметов, изготовленных из металлов и диэлектриков.

Ключевые слова: радиоизображение, сканер, досмотр, безопасность

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Смокотин П.В., Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Кузьменко И.Ю., Муксунوف Т.Р., Федянин И.С. Радиоволновая бесконтактная система досмотра пассажиров // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 43–51. doi: 10.17223/7783494/1/7

Original article
doi: 10.17223/7783494/1/7

Radio-wave non-contact passenger inspection system

Pavel V. Smokotin¹, Sergey E. Shipilov², Rail N. Satarov³, Ivan Yu. Kuzmenko⁴,
Timur R. Muksunov⁵, Ivan S. Fedyanin⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *ckpelectronics@gmail.com*

² *s.shipilov@gmail.com*

³ *satarov.rail@gmail.com*

⁴ *kuzmenko.ivan.yu@gmail.com*

⁵ *t0snake0mr@ya.ru*

⁶ *vanyaff@sibmail.com*

Abstract. To solve the problem of ensuring security in crowded places, a prototype of a radio wave non-contact inspection system based on a mechanically moved multi-element antenna array with transceiver modules at a frequency of 24 GHz was developed. This system allows to scan a person in less than 3 seconds. Based on the results of multi-angle probing based on the principle of aperture synthesis, a radio image of a person is calculated with a resolution of less than 1 centimeter. The resulting radio images can be used to detect and recognize objects hidden under clothing on the human body, made of metals and dielectrics.

Keywords: radio-image, scanner, inspection, security

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Smokotin, P.V., Shipilov, S.E., Satarov, R.N., Kuzmenko, I.Yu., Muksunov, T.R. & Fedyanin, I.S. (2023) Radio-wave non-contact passenger inspection system. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 43–51. doi: 10.17223/7783494/1/7 (In Russian).

Введение

Из-за угрозы террористических актов обеспечение безопасности в местах, где формируются большие потоки людей (аэропорты, вокзалы, массовые мероприятия и т.п.) является одной из актуальных проблем. В таких местах скопления людей необходимо своевременно обнаруживать пронос запрещенных предметов.

Наиболее защищенными от проноса запрещенных предметов объектами транспортной инфраструктуры являются аэропорты, где для досмотра пассажиров и грузов применяется целый комплекс разнообразных современных технических средств. Одним из самых эффективных устройств этих комплексов является рентгеновский интроскоп. При его использовании (в зависимости от мощности излучения) можно получить изображение не только объектов, расположенных под одеждой на теле человека, но и «заглянуть» внутрь человека. При этом необходимо отметить, что рентгеновское излучение, используемое в рентгеновских интроскопах, может быть небезопасно для здоровья человека при его частом и многократном воздействии. Таким образом, использование рентгеновского интроскопа является ограниченно функциональным.

При проведении массовых мероприятий основным техническим средством, используемым службами безопасности для досмотра людей, является досмотровый металлодетектор. Но такой металлодетектор не может обнаруживать предметы, выполненные из диэлектрических материалов, а именно к таким предметам можно отнести, например, взрывчатку.

Как альтернатива рентгеновским интроскопам и дополнение к металлодетекторам рассматривается радиоволновая бесконтактная система досмотра. Изображение, получаемое с ее помощью, позволяет обнаруживать скрытые под одеждой предметы, изготовленные из металла и диэлектрических материалов. В настоящее время в мире уже существуют подобные радиоволновые системы досмотра, напри-

мер, система Safescout (PROVISION) производства американской компании L-3 Communications [1], обеспечивающая многоракурсное зондирование объекта. В то же время аналогичные российские разработки пока на рынке оборудования для безопасности не представлены.

Основными преимуществами радиоволновой бесконтактной системы досмотра являются отсутствие ограничений по количеству досмотров и относительная простота транспортировки, настройки и монтажа. Целью разработки прототипа радиоволновой бесконтактной системы досмотра является экспериментальное моделирование технологии радиовидения.

Антенная решетка

В качестве элемента плоской антенной решетки благодаря доступности, небольшим размерам (можно легко объединять в решетку) и безопасности для человека (небольшая мощность излучения) был выбран доплеровский измеритель перемещений RSM2650 производства V+B Thermo-Technik GmbH (рис. 1, *a* – внешний вид). Он является миниатюрным радиолокационным модулем со следующими основными параметрами:

- опорная частота – f_{\max} 24 GHz ... 24,250 GHz;
- излучаемая мощность – 16 дБм.

Конструктивно модуль RSM2650 состоит из следующих радиоэлектронных узлов (рис. 1, *b* – принципиальная схема):

- передающая антенна – TX;
- приемная антенна – RX;
- генератор опорной частоты – 1;
- фазовращатель – 2;
- смеситель – 3, 4;
- фильтр нижних частот (ФНЧ) – 5, 6.

Модуль RSM2650 обеспечивает возможность получения двух квадратурных составляющих принимаемого сигнала для измерения его фазы. Измеренная фаза принимаемого сигнала в дальнейшем используется для построения радиоизображения.

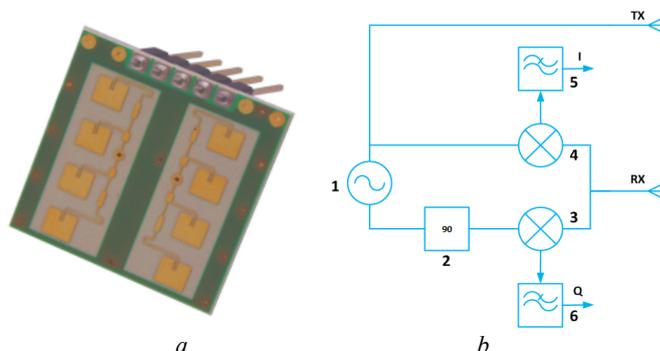


Рис. 1. Внешний вид модуля (*a*) и его принципиальная схема (*b*)

Fig. 1. Exterior view of the sensor (*a*) and its block diagram (*b*)

Для получения качественного радиоизображения необходимо наличие многоракурсных измерений исследуемого объекта. Рассчитаем необходимое количество пространственно разнесенных измерений – волновых проекций для построения радиоизображения человека. Сначала определим пространственный разнос между точками, в которых надо провести измерения с учетом теоремы Котельникова для антенной решетки. Максимальный шаг между волновыми проекциями рассчитывается по формуле

$$d = \frac{c}{2f_{\max}} = 0,006 \text{ м} = 6 \text{ мм},$$

где c – скорость света. Уменьшение шага d приводит к более высокому качеству полученного радиоизображения за счет повышения отношения сигнал/шум (ОСШ) при суммировании сигналов. Такой прием также позволяет увеличить дальность действия системы без увеличения мощности излученного сигнала. При проектировании решетки шаг d между измерениями был уменьшен с 6 до 2 мм. Тогда количество волновых проекций, необходимых для получения радиоизображения человека с рабочей зоной высотой $H = 2$ м и шириной $L = 0,8$ м, составит

$$N = \frac{HL}{d^2} = 4 \times 10^5.$$

Для увеличения пропускной способности создаваемой системы необходимо минимизировать время

измерения полного набора волновых проекций. В качестве ориентира было выбрано время, затрачиваемое при контроле человека рамкой металлодетектора на входе в аэропорт. Оно составляет около 3 с. Таким образом, необходимо реализовать 400 000 измерений отраженного сигнала за время не более чем 3 с.

Для построения системы радиовидения была выбрана схема, в которой получение полного набора волновых проекций в рабочей зоне обеспечивалось за счет совмещения механического перемещения антенной решетки по высоте рабочей зоны и ее электронного сканирования. Такой подход позволяет сократить число требуемых для зондирования модулей на 2 порядка и, как следствие, существенно снизить стоимость всей системы в целом. Антенная решетка состоит из четырех независимых подрешеток. Каждая подрешетка состоит из 12 линеек по 8 модулей, сдвинутых одна относительно другой на 2 мм по горизонтали (рис. 2). Такой сдвиг обеспечивает при вертикальном механическом перемещении решетки заданный шаг сканирования по горизонтали в 2 мм. Общая длина 4 подрешеток составляет около 80 см. Опрос модулей RSM2650 проводится последовательно. Это необходимо для исключения взаимного влияния одновременно работающих модулей RSM2650 друг на друга, т.е. одновременно в каждой подрешетке включается и опрашивается по одному модулю RSM2650.

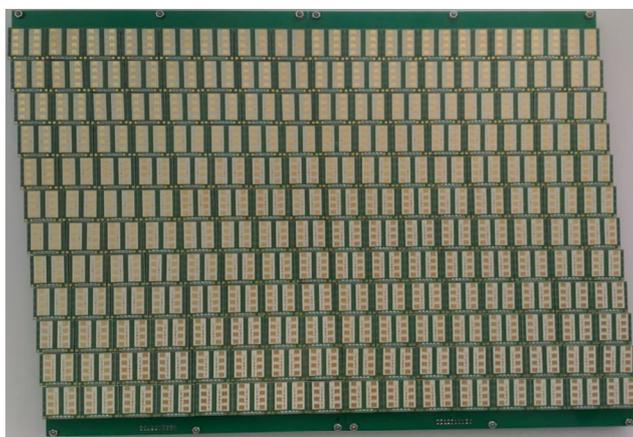


Рис. 2. Два блока антенной решетки. Каждый блок состоит из 96 модулей RSM2650

Fig. 2. Two Antenna array blocks with 96 RSM2650 sensors

Проникающая способность радиоволнового излучения

При обнаружении предметов на теле человека встает вопрос об эффективности проникновения радиоволн через одежду на опорной частоте модуля RSM2650. Эти исследования наиболее полно представлены в работах [2–10]. На рис. 3 показаны измеренные авторами значения коэффициентов однократного прохождения радиоизлучения для некото-

рых материалов, которые используются при производстве одежды и упаковочной тары или близки к ним по своим характеристикам. Здесь 1 – свободное пространство (воздух); 2 – фанера толщиной 0,5 см; 3 – ткань из микрофибры; 4 – пенопласт толщиной 2,5 см; 5 – поролон толщиной 2 см; 6 – книга толщиной 2,7 см. Так, например, книга обладает значительным поглощением и имитирует по своей проникающей способности влажное пальто из шерсти.

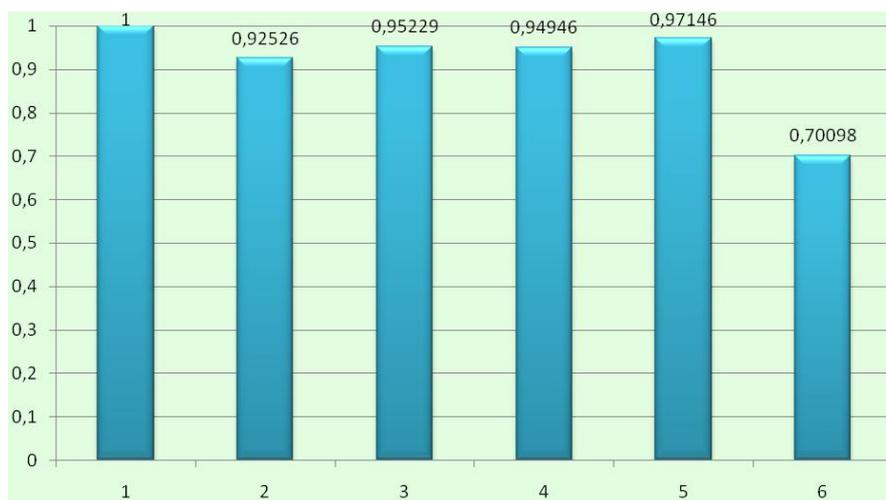


Рис. 3. Коэффициент прохождения радиоизлучения через различные препятствия

Fig. 3. Radio transmission coefficient

Из рис. 3 видно, что минимальный коэффициент прохождения (передачи) на опорной частоте модуля RSM2650 имеет значение 0,7, т.е. коэффициент прохождения на данной частоте для перечисленных материалов близок к единице. Следовательно, одежда не является серьезной преградой для частоты 24 ГГц.

Принцип построения радиоизображения

При сканировании объекта зондирования, когда матрица модулей RSM2650 перемещается в плоскости, перпендикулярной направлению на объект, принимаемый сигнал является результатом интерференции множества волн, отраженных от объекта. В роли множества интерферирующих волн выступают сигнал опорного генератора, расположенного в модуле RSM2650, и сигнал, отраженный от объекта. Полученное таким образом интерференционное радиоизображение является основой для восстановления реального распределения неоднородностей [11-14]. При этом существует возможность регулировки глубины фокусировки. В технологии радиолокации с синтезированной апертурой (РСА) для обработки радиоизображения необходимо задание аппаратной функции системы (АФС), являющейся локационным пространственно-временным откликом на точечный отражатель [15-17].

Сформулируем модель формирования АФС. Если волновые проекции регистрируются на плоскости ОХУ в точке \mathbf{p} , а точечный отражатель находится в точке с координатами $\mathbf{r}_0 = (\mathbf{p}_0, z_0)$, то принятый в точке наблюдения $E_0(\mathbf{p})$ сигнал без учета диаграммы направленности антенны записывается как

$$E_0(\mathbf{p}) = A_0 G^2(\mathbf{p} - \mathbf{r}_0), G(\mathbf{r}) = \exp(i k |\mathbf{r}|) / |\mathbf{r}|, k = 2\pi f_{\max} / c,$$

где G – функция Грина сферической волны, A_0 – коэффициент отражения от поверхности объекта. После применения двумерного преобразования Фурье к сигналу $E_0(\mathbf{p})$ по пространственным координатам полученный образ $E_0(\mathbf{u})$ и будет АФС.

Для восстановления радиоизображения зондируемого объекта по его интерференционной картине в радиолокации, как и в оптике, используют последовательность преобразований, которая прямо следует из спектрального подхода к задаче дифракции. Первый шаг – двумерное преобразование Фурье от интерференционной картины

$$F_n(\mathbf{u}) \Leftrightarrow f_n(\mathbf{p}).$$

Второй шаг – умножение Фурье-образа предметного поля на комплексно сопряженный Фурье-образ АФС

$$F(\mathbf{u}) = F_n(\mathbf{u}) E_0^*(\mathbf{u}).$$

И наконец, восстановленное радиоизображение находится с помощью вычисления обратного преобразования Фурье

$$f(\mathbf{p}) \Leftrightarrow F(\mathbf{u}).$$

Данный алгоритм был реализован программно и использовался для получения радиоизображений тестовых сцен при зондировании механически перемещаемой антенной решеткой, состоящей из модулей RSM2650.

Прототип системы досмотра и блок регистрации волновых проекций

На рис. 4 представлен прототип системы досмотра, у которого антенная решетка перемещается со скоростью 1 м/с. Данный прототип имеет следующие параметры:

– скорость сканирования 1 м/с;

- область сканирования $0,8 \times 2$ м;
- питание 220 В;
- связь и управление по Ethernet.

Антенная решетка состоит из четырех одинаковых блоков (подрешеток) по 96 модулей RSM2650. Все блоки объединены через интерфейс Ethernet 1G в единую сеть для последующей передачи измеренных волновых проекций в модуль вычисления ра-

диоизображения. Модуль вычисления был реализован на базе ПК. Для передачи пакетов с данными между платой управления и модулем вычисления использовался протокол с квитируванием на основе UDP, не допускающий потери пакетов. Для его реализации применялось IP ядро MicroBlaze фирмы Xilinx.



Рис. 4. Вид прототипа радиоволновой бесконтактной системы досмотра

Fig. 4. Prototype view of the radio-wave non-contact inspection system

В подрешетках использовалась электронная коммутация с последовательным опросом модулей RSM2650. Таким образом, одновременно в общей решетке опрашивалось 4 модуля RSM2650. Влияние одновременно работающих модулей RSM2650 друг на друга было минимальным из-за пространственного разнеса и некоторой разницы в частоте зондирования, которая по паспортным данным могла варьироваться в пределах 1% от опорной частоты. На каждый опрос одного модуля RSM2650 затрачивалось 10 мкс, которые состоят из времени установления рабочего состояния, времени измерения и времени выключения. Таким образом, опрос всей решетки проводился менее чем за 1 мс. При средней скорости вертикального сканирования 1 м/с общее время опроса рабочей зоны составило около 2 с.

Полученные радиоизображения и их анализ

Пример исходных данных в виде интерференционной картины при зондировании объекта в виде металлического шарика диаметром 1 см представлен на рис. 5, а. Эти данные использовались для построения

аппаратной функции системы. На рис. 5, б представлено его радиоизображение.

Пример металлизированного многоугольника с размерами ступеньки 5 см представлен на рис. 6. В этом многоугольнике находится отверстие квадратной формы размером 2×2 см. На рис. 6, а представлена фотография этого металлизированного многоугольника, на рис. 6, б – его интерференционная картина, по которой возможно определить форму и размеры зондируемого объекта. На представленном радиоизображении (рис. 6, в) идентифицируются не только границы фигуры, но и отверстие квадратной формы. Полученный результат позволяет оценить приблизительно детальность радиоизображения, которая с учетом качества восстановления отверстия не хуже 0,5 см.

На рис. 7 представлено восстановленное радиоизображение тестового образца имитатора взрывчатого вещества (ВВ) размерами 8×6 см, размещенного на картонной коробке. Имитатор ВВ представлял собой кусок мыла, которое имеет диэлектрическую проницаемость, близкую к диэлектрической проницаемости ВВ.

Одним из возможных применений радиоволновой бесконтактной системы является досмотр грузов в диэлектрических тарах. На рис. 8, *a* представлена интерференционная картина предметов (бутылки с водой и пластиковый пистолет), помещённых в диэлектрическую непрозрачную коробку; на рис. 8, *b* – их радиоизображение.

На рис. 9 представлены интерференционная картина и радиоизображение керамического ножа как примера холодного оружия, не регистрируемого досмотровыми металлодетекторами.

На рис. 10 представлено восстановленное радиоизображение тела живого человека с закрепленным на нем имитатором ВВ (*a*) и без него (*b*).

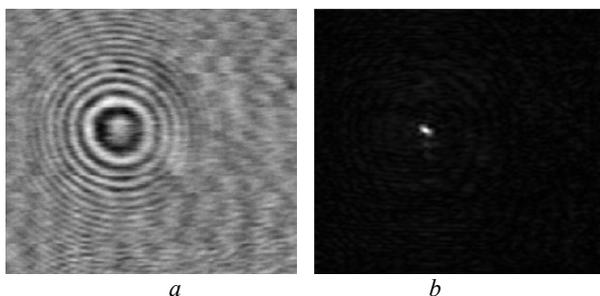


Рис. 5. Интерференционная картина металлического шарика (*a*) и его радиоизображение (*b*)

Fig. 5. Interference pattern of a metal ball (*a*) and its radio image (*b*)

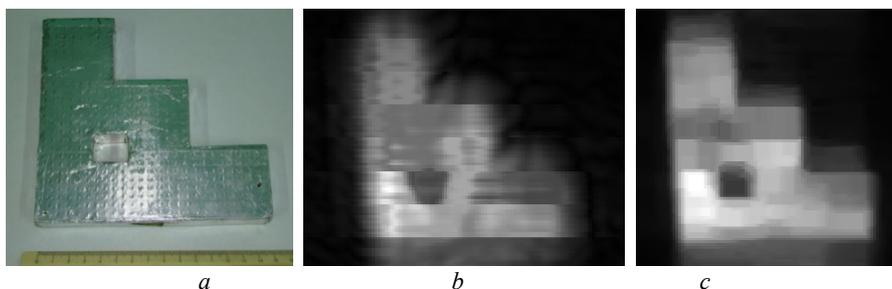


Рис. 6. Фотография металлизированного многоугольника (*a*), его интерференционная картина (*b*) и радиоизображение (*c*)

Fig. 6. Photograph of the test object (*a*), its interference pattern (*b*) and radio image (*c*)

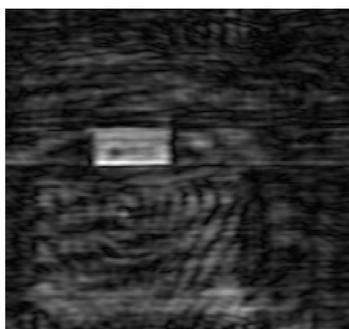


Рис. 7. Радиоизображение имитатора ВВ

Fig. 7. The radio image of the explosion simulator

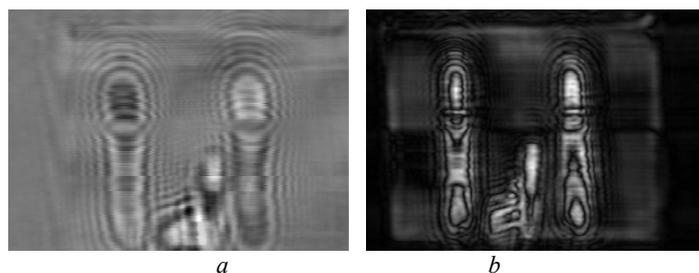


Рис. 8. Интерференционная картина (*a*) и радиоизображение (*b*) содержимого коробки

Fig. 8. Interference pattern (*a*) and radio image (*b*) of the box contents

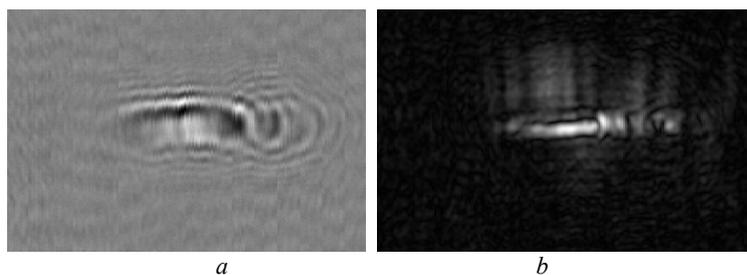


Рис. 9. Интерференционная картина (а) и радиоизображение керамического ножа (b)

Fig. 9. Interference pattern (a) and radio image of a ceramic knife (b)

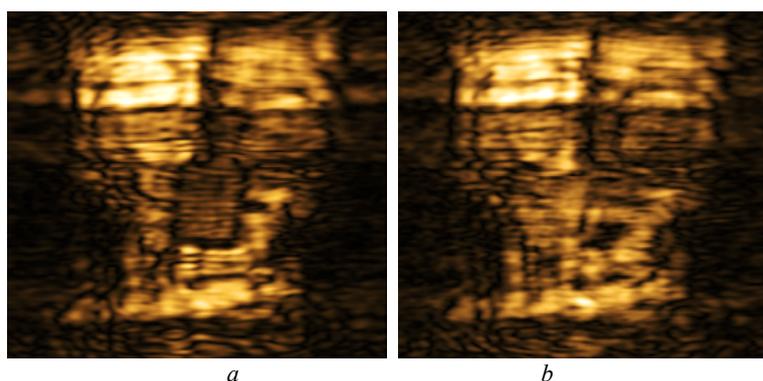


Рис. 10. Радиоизображение человека с закрепленным имитатором ВВ (а) и без него (b)

Fig. 10. Radio image of a person with a fixed BB simulator (a) and without it (b)

При сравнении этих радиоизображений (см. рис. 10, а и b) видно, что имитатор ВВ выделяется на фоне человеческого тела.

Заключение

Разработанный действующий прототип радиоволновой бесконтактной системы досмотра на основе матрицы модулей RSM2650 позволяет производить поиск скрытых под одеждой человека малоразмерных предметов без вреда для человека. Этот поиск происходит путем регистрации распределения квадратурных составляющих радиосигналов, которое оказывается необходимым и достаточным условием для построения радиоизображений зондируемых объектов методом апертурного синтеза на частоте зондирования 24 ГГц. Конструкция разработанной антенной решетки обеспечивает шаг скани-

рования по горизонтали в 2 мм, что позволило увеличить наполнение апертуры в поперечном направлении.

Разработана и экспериментально подтверждена методика построения радиоизображения зондируемого объекта по результатам одночастотной радиолокации. Прототип радиоволновой бесконтактной системы досмотра позволяет построить картину зондируемого объекта, сфокусированную на поперечную плоскость, проходящую через объект, не только по форме объекта, но и по его рельефу.

В ходе дальнейшей работы планируется внедрение автоматических алгоритмов построения радиоизображений от различных предметов (различные виды холодного и огнестрельного оружия, взрывных устройств и т.п.), в том числе и на основе алгоритмов обучения нейронных сетей.

Список источников

1. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Airport Passenger Screening Using Millimeter Wave Machines: Compliance with Guidelines*. Washington DC : The National Academies Press, 2017. V. 185. P. 10–22.
2. Федянин И.С., Клюков А.В. Доплеровский метод измерения диэлектрической проницаемости влажных материалов // Труды 5-й конференции студенческого научно-исследовательского инкубатора. Томск : Изд-во Томского государственного университета, 2008. С. 62.
3. Papathanassiou K.P., Cloude S.R. Single baseline polarimetric SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39 (11). P. 2352–2363.
4. Mette T., Papathanassiou K.P., Hajnsek I. Biomass estimation from polarimetric SAR interferometry over heterogeneous forest terrain // IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS '04. 2004. 20–24 Sept. V. 1. P. 511–514.

5. Praks J., Kugler F., Papathanassiou K., Hajnsek I., Hallikainen M. Height estimation of boreal Forest: interferometric model based inversion at L and X-band. HUTSCAT profiling scatterometer // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2007. V. 4(3). P. 466–470.
6. Cloude S.R., Papathanassiou P.K., Pottier E. Radar Polarimetry and Polarimetric Interferometry // *IEICE Transactions on Electronics*. 2001. V. 84(12). P. 1814–1822.
7. Kaestner A.P., Baath L.B. Microwave Polarimetry Tomography of Wood // *IEEE Sensors Journal*. 2005. V. 5(2). P. 209–215.
8. Cloude S.R., Papathanassiou P.K. Three-Stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry // *IET Radar, Sonar and Navigation*. 2003. V. 150(3). P. 125–134.
9. King R.J. Microwave electromagnetic nondestructive testing of wood // *Symposium on Non-Destructive Testing of Wood*. Washington State University proceedings, 1978. P. 121–134.
10. Вопросы подповерхностной радиолокации / под ред. А.Ю. Гринёва. М.: Радиотехника, 2005. 416 с.
11. Головкин М.М., Почанин Г.П. Применение преобразования Хо для автоматического обнаружения объектов на георадарном профиле // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2004. № 9–10. С. 22–30.
12. Groenenboom J., Yarovoy A.G. Data processing for a landmine detection dedicated GPR // *Eighth International conference on Ground Penetrating Radar*. 2000. P. 367–371.
13. Franchois A., Pichot C. Microwave imaging – complex permittivity reconstruction with a Levenberg – Marquardt method // *IEEE transactions on antennas and propagation*. 1997. V. 45(2). P. 203–215.
14. Якубов В.П., Суханов Д.Я. Решение обратной задачи подповерхностной локации в приближении сильно преломляющей среды // *Известия высших учебных заведений. Радиофизика*. 2007. № 50(4). С. 329–338.
15. Суханов Д.Я., Якубов В.П. Применение сигналов с линейной частотной модуляцией в трехмерной радиотомографии // *Журнал технической физики*. 2010. № 80(4). С. 115–119.
16. Якубов В.П., Мирончев А.С., Андреев А.Г., Пономарева И.О. Искусственные метаматериалы и радиотомография // *Известия вузов. Физика*. 2010. № 53(9). С. 17–20.

References

1. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2017) *Airport Passenger Screening Using Millimeter Wave Machines: Compliance with Guidelines*. Washington DC: The National Academies Press. 185. pp. 10–22.
2. Fedyanin, I.S. & Klokov, A.V. (2008) Doppler method for measuring dielectric permittivity of wet materials. *Proceedings of the 5th conference of the Student Research Incubator*. Tomsk: Publishing House of Tomsk State University. pp. 62.
3. Papathanassiou, K.P. & Cloude, S.R. (2001) Single baseline polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 39(11). pp. 2352–2363.
4. Mette, T., Papathanassiou, K.P. & Hajnsek, I. (2004) Biomass estimation from polarimetric SAR interferometry over heterogeneous forest terrain. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS '04, 20-24 Sept. 2004*. 1. pp. 511–514.
5. Praks, J., Kugler, F., Papathanassiou, K., Hajnsek, I. & Hallikainen, M. (2007) Height estimation of boreal Forest: interferometric model based inversion at L and X-band vs. HUTSCAT profiling scatterometer. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 4(3). pp. 466–470.
6. Cloude, S.R., Papathanassiou, P.K. & Pottier, E. (2001) Radar Polarimetry and Polarimetric Interferometry. *IEICE Transactions on Electronics*. 84(12). pp. 1814–1822.
7. Kaestner, A.P. & Baath, L.B. (2005) Microwave Polarimetry Tomography of Wood. *IEEE Sensors Journal*. 5(2). pp. 209–215.
8. Cloude, S.R. & Papathanassiou, P.K. (2003) Three-Stage Inversion Process for Polarimetric SAR Interferometry. *IET Radar, Sonar and Navigation*. 150(3). pp. 125–134.
9. King, R.J. (1978) Microwave electromagnetic nondestructive testing of wood. *Symposium on Non-Destructive Testing of Wood*. Washington State University proceedings. pp. 121–134.
10. Grinev A.Yu. (Ed.) (2005) *Issues of subsurface radiolocation*. Moscow: Radiotekhnika Publisher. pp. 416.
11. Golovko, M.M. & Pochanin, G.P. (2004) Application of Xo transform for automatic detection of objects on GPR profile. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 9-10. pp. 22–30.
12. Groenenboom, J. & Yarovoy, A.G. (2000) Data processing for a landmine detection dedicated GPR. *Eighth International conference on Ground Penetrating Radar*. pp. 367–371.
13. Franchois, A. & Pichot, C. (1997) Microwave imaging – complex permittivity reconstruction with a Levenberg – Marquardt method. *IEEE transactions on antennas and propagation*. 45(2). pp. 203–215.
14. Yakubov, V.P. & Sukhanov, D.Ya. (2007) The solution of the inverse problem of subsurface location in the strongly refractive medium approximation. *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Radiofizika*. 50(4). pp. 329–338.
15. Sukhanov, D.Ya. & Yakubov, V.P. (2010) Application of signals with linear frequency modulation in three-dimensional radio tomography. *Journal of Technical Physics*. 80(4). pp. 115–119.
16. Yakubov, V.P., Mironchev, A.S., Andretsov, A.G. & Ponomareva, I.O. (2011) Artificial metamaterials and radio tomography. *Russian Physics Journal*. 53(9). pp. 895–899.

Информация об авторах:

Смокотин Павел Валерьевич – аспирант Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: ckpelectronics@gmail.com

Шипилов Сергей Эдуардович – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой радиофизики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: s.shipilov@gmail.com

Сатаров Раиль Наилевич – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник лаборатории терагерцовых исследований Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: satarov.rail@gmail.com

Кузьменко Иван Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиофизики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: kuzmenko.ivan.yu@gmail.com

Муксунов Тимур Рамильевич – кандидат технических наук, инженер-исследователь научно-образовательного центра «Технологии безопасности» Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: t0snake0mr@ya.ru.

Федянин Иван Сергеевич – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией методов, систем и технологий безопасности Сибирского физико-технического института Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: vanyaff@sibmail.com.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Smokotin Pavel V., PhD student, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russia). E-mail: ckpelectronics@gmail.com

Shipilov Sergey E., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), head of department, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: s.shipilov@gmail.com

Satarov Rail N., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: satarov.rail@gmail.com

Kuzmenko Ivan Yu., Cand.Sc. (Engineering), associate professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: kuzmenko.ivan.yu@gmail.com

Muksunov Timur R., Cand.Sc. (Engineering), engineer-researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: t0snake0mr@ya.ru

Fedyanin Ivan S., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), head of laboratory, Siberian Physics and Technology Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: vanyaff@sibmail.com

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023

Научная статья
УДК 179.1
doi: 10.17223/7783494/1/8

Самодельное 3D-печатное оружие как вызов открытому интернету

Максим Германович Криницын¹

¹ *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия, krinmax@gmail.com*

Аннотация. Рассматриваются вопросы 3D-печати оружия – проводится краткий обзор ключевых событий, произошедших в этой области, обозначены основные морально-этические и философские проблемы, возникающие в этой сфере, приводится их обсуждение.

Ключевые слова: 3D-печать, создание оружия, открытый интернет

Для цитирования: Криницын М.Г. Самодельное 3D-печатное оружие как вызов открытому интернету // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 52–59. doi: 10.17223/7783494/1/8

Original article
doi: 10.17223/7783494/1/8

Homemade 3D-printed firearms as a challenge to the open Internet

Maksim G. Krinitcyn¹

¹ *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation, krinmax@gmail.com*

Abstract. Over the past two decades, the pace of development and adoption of technology has increased dramatically. Technologies have become available to mankind, the introduction of which into industry and everyday life was only worth dreaming of before, and now they have not only become a reality, but also continue to develop and improve. One such achievement of scientific and technological progress is 3D printing. The most widespread and developed 3D printing technology involves the layer-by-layer formation of a product according to a given 3D model using a melted plastic rod. The technology is fully automated - control is carried out from a computer, and for printing, in addition to the printer itself and the plastic for it, software is needed, including those available in the public domain, as well as a 3D model of the desired object. The availability of 3D plastic printing technology over the past 10 years has greatly increased, and the number of specialists working in this field, or simply considering it as a hobby, has also increased. At the same time, the scope of 3D printing is very different - from souvenirs, toys and jewelry, to serious solutions in the industry. Do not stand aside and areas, the work on the manufacture of parts in which is associated with serious legal regulation, and sometimes illegal. This article discusses the issues of 3D printing of weapons - a brief overview of the key events that have taken place in this area is given, the main moral, ethical and philosophical problems that arise in this area are identified, and their discussion is given. The development of 3D printing technologies and their introduction into everyday life, of course, has made it possible to improve and simplify the lives of many people in different areas of their lives. Despite the fact that the article deals with 3D printing with plastic, even today printing technologies with metal, ceramics and composites are becoming more accessible, and the time when metal 3D printing will become available at the household level is not far off. Along with the development of 3D printing technologies, social and legal problems arise, which are impossible and simply dangerous to ignore. The example of 3D printed weapons is one such example. As shown in the article, the situation with the 3D printing of weapons has more than a decade of history, while, despite the absence of any crystallized legal mechanisms for its regulation, the situation does not get out of control. The main reasons here are the internal regulation of the issue by the Internet, and the concern on this issue arises primarily due to the overly idealized and simplistic public perception of the 3D printing process as a whole.

Keywords: 3D printing, gunsmithing, open internet

For citation: Krinitcyn, M.G. (2023) Homemade 3D-printed firearms as a challenge to the open Internet. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 52–59. doi: 10.17223/7783494/1/8 (In Russian).

Введение

За последние два десятка лет скорость развития и внедрения технологий сильно выросла. Человечеству теперь доступны технологии, о внедрении которых в промышленность и быт раньше только стоило мечтать, а теперь они не только стали явью, но и продолжают развиваться и совершенствоваться. Од-

ним из таких достижений научно-технического прогресса является 3D-печать. Наиболее распространенная и развитая технология 3D-печати включает в себя послойное формирование изделия по заданной 3D-модели с помощью расплавленного прутка пластика. Технология полностью автоматизирована – управление осуществляется с компьютера, а для пе-

чати, помимо самого принтера и пластика к нему, необходимо программное обеспечение, в том числе имеющееся в открытом доступе, а также 3D-модель желаемого объекта.

Доступность технологии 3D-печати пластиком за последние 10 лет сильно повысилась, увеличилось и количество специалистов, работающих в этой области или же просто рассматривающих её как хобби. При этом сферы применения 3D-печати очень различны – от сувениров, игрушек и украшений до серьезных решений в промышленности. Не остались в стороне и сферы, работа по изготовлению деталей в которых сопряжена с серьезной нормативно-правовой регуляцией, а иногда и незаконна. В настоящей статье рассматриваются вопросы 3D-печати оружия – проводится краткий обзор ключевых событий, произошедших в этой области, обозначены основные морально-этические и философские проблемы, возникающие в этой сфере, приводится их обсуждение.

Развитие 3D-печати оружия

В конце 2011 г. в репозиторий Thingiverse (основной веб-сайт для обмена и загрузки 3D-моделей, которые можно распечатать на 3D-принтере) было загружено несколько моделей, которые выделялись среди тысяч рядовых моделей игрушек и украшений. 17 сентября пользователь *crank* загрузил модель магазина боеприпасов, совместимого с платформой винтовки AR-15 (популярное оружие в США), а затем в интернете появился проект нижней ствольной коробки для винтовки того же типа. Эта 3D-модель вызвала переполох, и вот почему. Нижняя часть ствольной коробки – это рама, которая скрепляет все остальные части огнестрельного оружия. В США все остальные комплектующие для винтовки можно купить без разрешения. Нижний ресивер, представлен-

ный в 3D-модели, – единственная деталь, перед покупкой которой требуется проверка биографических данных или оформление любых других документов [1]. Это говорит о том, что при наличии соответствующего оборудования и навыков эти правила можно полностью обойти.

Произошедшее всколыхнуло общественность, однако это было только началом. В июле 2012 г., после нескольких тестовых сеансов печати, студент Майкл Гуслик успешно напечатал из пластика собственноручно созданную 3D-модель нижнего ресивера AR-15 (рис. 1), используя промышленный принтер для быстрого прототипирования фирмы *Stratasys*, при этом в своем блоге он подробно описал его подготовку и сборку. Успех Гуслика широко обсуждался в сообществе оружейников и производителей и получил широкое освещение в прессе, которая пророчила потенциальный «конец контроля над оружием». Однако, признавая тот факт, что обход регулирования огнестрельного оружия путем печати своих собственных деталей теперь был подтвержденной возможностью, акцент в этих дебатах по-прежнему делался на легкости производства этих деталей, но не сиюминутно, а в скором будущем, когда керамические и металлические детали будут изготавливаться в более дешевых принтерах, что позволит печатать оружие целиком, а не только его регулируемый компонент. Это заставило многих задуматься, хотя достижение Гуслика было лишь скромно освещено в популярных СМИ, а сам нижний ресивер не считался серьезным вызовом для регулирующих органов. Освещение в СМИ вопросов печати оружия (вплоть до достижений Гуслика), в основном, вращалось только вокруг технических аспектов печати оружия и слегка касалось некоторых нормативных проблем, связанных с надзором за вооружением населения.

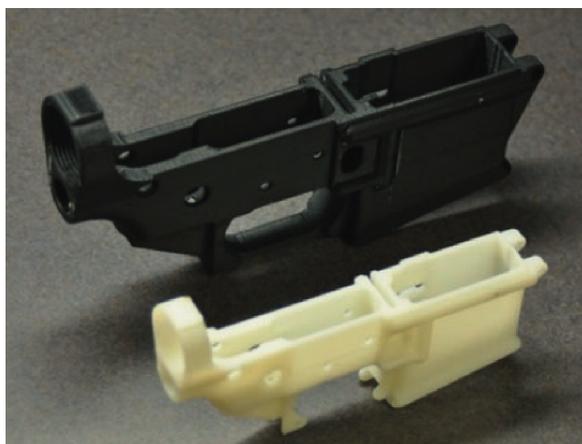


Рис. 1. Распечатанный нижний ресивер винтовки AR-15

Fig. 1. Printed lower receiver of the AR-15 rifle

Однако вскоре всё изменилось – 2 мая 2013 г. был представлен первый прототип пистолета под названием Liberator – освободитель (рис. 2). В интернете появилось видео, на котором создатель пистолета Коди Уилсон стреляет из него вручную, без использования станков для пристрелки или подобных приспособлений. Более того, на следующий день на Defcad.org публикуется САД-файл проекта Liberator. 8 мая Государственный департамент США выпускает постановление, в котором веб-сайту предписывается удалить Liberator и другие спорные файлы из публичного доступа. Несмотря на то, что администрация сайта исполнила требования почти сразу, счетчик скачивания проекта Liberator к тому моменту уже перевалил за 100 000 раз [2]. Кроме того, файлы оставались доступными на ряде более устойчивых каналов обмена файлами, в частности,

на печально известной платформе обмена файлами The Pirate Bay.

В 2015 г. другой студент Джеймс Патрик загрузил на свой YouTube-канал видео, демонстрирующее полностью функциональный револьвер PM522 Washbear .22LR, который он разработал и напечатал на 3D-принтере с применением PLA пластика (рис. 3). За исключением ударника, нескольких эластичных лент, которые действуют как пружины, и требуемого законом количества обнаруживаемого металла весь пистолет, включая корпус и цилиндр, полностью напечатан на 3D-принтере. Для изготовления использовались металлические детали, доступные любому желающему без получения каких-либо лицензий или разрешений. Более того, при желании содержание металла в корпусе можно уменьшить.



a



b

Рис. 2. Детали пистолета Liberator (*a*) и сам пистолет в сборе (*b*)

Fig. 2. Parts of the Liberator pistol (*a*) and the pistol itself (*b*)



Рис. 3. Распечатанный револьвер PM522 Washbear

Fig. 3. Printed revolver PM522 Washbear

Учитывая, что револьвер PM522 Washbear, напечатанный на 3D-принтере, гораздо более совершенен и удобен в использовании, чем Liberator, введение запрета на PM522 было лишь делом времени. Liberator, а позднее и PM522, было приказано удалить из интернета, потому что правительство заявило, что они нарушили Закон о контроле за экспортом оружия. Однако в 2018 г. иск, поданный Коди Уилсоном, создателем Liberator, был урегулирован. Этот шаг, по сути, сделал легальным размещение 3D-моделей огнестрельного оружия в интернете.

С некоторым опозданием в игру включились и более серьезные игроки. Так, например, в 2017 г. в Научно-исследовательском центре вооружений армии США распечатали на 3D-принтере ручной гранатомет и боеприпасы к нему (рис. 4). Причем подчеркивалось, что все детали были изготовлены именно в технологии 3D [3]. За основу конструкции были взяты известный ручной 40-миллиметровый

гранатомет M203 A1 и учебная граната M781, поскольку боевые к нему делать запретили. В действительности создатели несколько слукавили, поскольку для изготовления частично использовалась технология отливки пластика в формы.

Печать производилась не только по методу печати пластиком, но также с применением технологии селективного лазерного сплавления (СЛС) металлического порошка. Технология СЛС является очень дорогостоящей и доступна пока только в промышленных масштабах, причем экономическую обоснованность её применения в некоторых сферах необходимо еще доказывать. Остается не совсем ясным – было ли желание использовать технологию СЛС продиктовано необходимостью либо она была использована больше в целях привлечения внимания. Если без 3D-печати металлом в данном случае можно обойтись, то вновь встает вопрос о возможности изготовления такого оружия обывателями.



Рис. 4. Распечатанный гранатомет M203 A1

Fig. 4. Printed grenade launcher M203 A1



Рис. 5. Пример полностью напечатанного пистолета, изъятого канадской полицией в 2022 г.

Fig. 5. An example of a fully printed handgun seized by Canadian police in 2022

Были и другие примеры использования технологии 3D-печати пластиком для создания оружия, но частота появления подобных инфоповодов стала существенно снижаться после бума в 2011–2015 гг. Тем не менее 3D-печатные пистолеты никуда не исчезли – например, канадской полицией за 2022 г. было изъято более 100 пистолетов, напечатанных из пластика. Такое оружие невозможно отследить, поскольку достаточно напечатать только ресивер – единственную часть, для приобретения которой требуется лицензия, а остальные части можно докупить свободно (аналогично истории с AR-15 в 2011 г.). Кроме того, на этом можно не останавливаться и допечатывать другие части пистолета (рис. 5), а значит, количество металлических деталей можно свести к минимуму, используя 3D-модели существующего оружия. Такое оружие становится невидимым как юридически, так и физически (в первую очередь, для детекторов металла).

Обсуждение

Трудно не согласиться, что было бы сложно и при этом контрпродуктивно осуществлять строгое регулирование того, что и кем печатается. В действительности удаление конкретных 3D-моделей из интернета практически невозможно, в частности, из-за эффекта Стрейзанд [4, 5], кроме того, технологические средства контроля, скорее всего, можно обойти. Тем не менее по-прежнему странно делать вывод о том, что печатное огнестрельное оружие теперь стало неизбежной реальностью в дивном новом мире распределенного производства и информационных технологий и что любые попытки регулирования могут поставить под угрозу положительный потенциал 3D-печати, но при этом обречены на провал в области регулирования печати оружия.

Своеобразие этого фаталистического нарратива становится ясным, если сопоставить его с традиционными правилами обращения с огнестрельным оружием. В большинстве стран строго регламентированы производство, покупка, владение и использование огнестрельного оружия. Однако эти правила и контроль их соблюдения несовершенны и при желании, достаточной самоотверженности и необходимых навыках их можно обойти. Тем не менее этот факт обычно не заставляет людей считать эти правила неэффективными, бить тревогу и вести дискуссии на тему немедленного коренного изменения существующих правил.

Почему же тогда обход правил в отношении печатного оружия считается неудачей при тех же обстоятельствах? Центральная идея, которая лежит в основе многих из этих фаталистических аргументов, перекликается с замечанием самого Уилсона: если

вы не уничтожите 3D-модель Liberator или любую другую модель до самой последней копии, оно останется полностью доступным для каждого человека с подключением к интернету и может в любой момент снова начать широко распространяться. Другими словами, если один человек может обойти регулирование, то смогут и все. Это напоминает модель интернета от Мануэля Кастельса [6, 7] как совершенно однородную сеть без трения, работающую по бинарной логике: информация либо полностью доступна, либо не доступна вовсе. В этом случае регулирование будет настолько сильным, насколько сильно его самое слабое звено, и уже единичное нарушение полностью сведет на нет смысл регулирования.

Однако такое видение сильно недооценивает степень, в которой доступ человека к конкретному файлу данных опосредуется множеством факторов. Среди этих факторов – практика проектирования инфраструктуры интернета [8], социальная практика идеологии и поведенческих принципов интернета [9, 10], социально-материальная практика конструирования результатов поисковых систем [11]. Указанные авторы работают над тем, чтобы развеять такое абстрактное и примитивное представление об интернете в пользу основанного на практике эмпирического описания интернета как не плоского, а иерархического; не однородного, а дифференцированного; не бинарного, а субъективного. Для примера можно рассмотреть саму 3D-модель Liberator: в настоящий момент времени она существует на просторах интернета, но если не знать, где и как искать, то найти файлы будет очень сложно, и простые запросы в поисковике не приводят к нужному результату.

Основные репозитории 3D-моделей, такие как Thingiverse, используют стратегию саморегулирования, удаляя с сайта любые детали, связанные с оружием, создавая первый уровень контроля. Кроме того, без правильного запроса поисковые системы просто выдают новостные статьи с упоминанием Liberator, но редко ссылаются на то, где можно найти файл. В некоторых из этих новостных статей упоминается, что файл доступен на Pirate Bay [12], но из-за судебного иска о нарушении авторских прав Pirate Bay заблокирован многими интернет-провайдерами. Хотя файл по-прежнему доступен через множество зеркал и прокси-сайтов, для его нахождения там требуется уровень знаний, который значительно превышает уровень среднего пользователя интернета. И, наконец, даже если файл будет успешно получен, процесс печати модели совсем не подчиняется принципу «нажми на кнопку – получишь результат». Тем не менее сложно отрицать, что с годами доступность 3D-принтеров растет и уже

сейчас можно приобрести принтер меньше чем за 20 тыс. рублей. Вместе с этим увеличивается интерес к таким технологиям и появляется всё больше Кулибиных – самородков-самоучек, способных создавать 3D-принтеры либо модернизировать их, а также виртуозно работать на подобных машинах.

Но для создания оружия методом 3D-печати не нужно каждому обладать уникальным талантом – модель может быть сконструирована одним человеком, а благодаря сервисам типа Thingiverse стать доступна миллиону людей по всему миру. Таким образом, если на первоначальном этапе дискуссия о 3D-печатном оружии велась больше о контроле над оборотом оружия, то после прецедента с пистолетом Liberator обсуждение плавно переместилось в плоскость свободы слова и печати. В конечном счете Коди Уилсон, создатель Liberator, суд выиграл. Используя многократные провокации как инструмент для обеспечения непрерывного освещения в СМИ, Уилсон получил платформу для определения 3D-печатного оружия как вызова жаждущей контроля индустриальной / государственной «системе».

В ходе этого процесса был создан нарратив, в котором свободный интернет и регулирование оружия принципиально противоречат друг другу, что исключает из дебатов золотую середину, где и как можно регулировать нежелательные артефакты, такие как оружие. Вместо того, чтобы подвергать сомнению это противоречие, ранние авторы, как правило, принимали это противоречие. Более того, на первоначальном этапе преобладало мнение, что любые попытки регулирования могут нанести ущерб положительным аспектам бесплатного интернета и 3D-печати – в конце концов, они обречены на провал, поскольку любые правила, при желании, можно обойти. В результате, хоть и с большой неохотой, признавалось, что печатное оружие – неотвратимая реальность в будущем распределенного производства.

Однако настойчивость Уилсона в отношении взаимоисключающего различия по принципу «все или ничего» между свободным интернетом и эффективным контролем над оружием кажется чрезмерным упрощением. В то время как подобная трактовка интернета как полностью свободного или полностью контролируемого была – и до сих пор – распространена во многих популярных дебатах о регулировании интернета, аргументация в этих дебатах в основном строится на несколько мифическом видении Интернета, которое кажется идеологическим, а не эмпирическим по своему происхождению. Это видение рассматривает интернет практически как организм, обладающий собственной внутренней логикой и законами, и потому общество не должно регулировать интернет, а просто приспосабливаться к нему.

Более того, это убеждение является мощным политическим фактором, учитывая его огромную популярность среди политиков и гуру менеджмента. Когда концептуализация интернет-регулирования принципиально противоречит «природе» интернета, чувство фатализма само по себе может препятствовать или подавлять попытки регулирования, тем самым укрепляя образ интернета как изначально «нерегулируемого». Таким образом, этот случай иллюстрирует, как технологический детерминизм в отношении неотъемлемого «будущего интернета» активизируется, с одной стороны, для противодействия попыткам регулирования свободного интернета, а с другой – зависит от того, что свободный интернет препятствует регулированию огнестрельного оружия.

При переходе от абстрактной теоретической точки зрения на регулирование печатного оружия к эмпирическому подходу, который делает упор на материальную практику, связанную с получением и печатью нежелательных объектов, становится ясно, что ряд достаточно эффективных механизмов регулирования уже существует. На самом деле, если рассмотреть описанные выше прецеденты, вышедшие из интернет-среды, вся разработка печатного оружия становится историей группы разработчиков моделей оружия и их постоянной реакцией на множество нормативных требований, налагаемых и обеспечиваемых почти всеми вовлеченными лицами и учреждениями – от администрации сайтов до государственных деятелей.

Говоря о вопросах административного регулирования, следует упомянуть Уголовный кодекс Российской Федерации (УК РФ). Статья 223 УК РФ предусматривает ответственность за незаконное изготовление, переделку и ремонт огнестрельного оружия, однако, формулировки статьи никак не ограничивают 3D-печать оружия. Эти вопросы уже обсуждаются в кругах юристов [13] и вносятся различные предложения – от внесения изменений в УК РФ, до введения принудительного лицензирования всех 3D-принтеров. Федеральный закон «Об оружии» от 13.12.1996, к которому апеллирует УК РФ, достаточно четко определяет оружие как «устройства и предметы, конструктивно предназначенные для поражения живой или иной цели, подачи сигналов», а также выделяет основные составные части оружия. Однако, возможности дизайна, доступные в 3D-печати, позволяют создавать де-факто оружие, которое де-юре невозможно классифицировать как таковое. Выход из данной ситуации предлагают криминалисты [14], однако, в случае возникновения реального прецедента с печатью оружия, предлагаемые ими методы не имеют превентивный характер и помогают интерпретировать уже свершившиеся события с применением 3D-печатного оружия.

Выводы

Развитие технологий 3D-печати и их внедрение в быт, безусловно, позволили улучшить и упростить жизнь многим людям в разных сферах их жизни. Несмотря на то, что в статье ведется речь о 3D-печати пластиком, уже сегодня технологии печати металлом, керамикой и композитами становятся всё более доступными, и не за горами то время, когда металлическая 3D-печать станет доступна на бытовом уровне. Вместе с развитием технологий 3D-печати возникают и социально-правовые проблемы, игнорировать которые невозможно и попросту опасно. Пример с 3D-печатью оружия является одним из таких примеров. Как показано в статье, ситуация с 3D-печатью оружия имеет более чем десятилетнюю историю, при этом, несмотря на отсутствие каких-либо кристаллизованных правовых механизмов её регулирования, ситуация не выходит из-под контроля. Основными причинами здесь является внутреннее регулирование вопроса интернетом, а тревога по этому вопросу возникает, в первую очередь, в связи с чрезмерно идеализированным и упрощенным представлением общества о процессе 3D-печати в целом.

Тем не менее по какой-то причине фаталистические нарративы имеют тенденцию игнорировать серьезные практические сложности, возникающие в ходе печати функционального оружия. При таком сценарии любые попытки усложнить использование принтеров для производства оружия в корне противоречат надвигающемуся технологическому будущему. Несмотря на широкое признание этого сценария, он остается весьма частным видением будущего. В своем технологическом детерминизме он игнорирует ряд альтернативных сценариев, оставляющих больше возможностей для вмешательства регулирующих органов. Несмотря на наличие таких возможностей, компетентные органы не спешат вести работу по регулированию 3D-печатного оружия, в том числе на уровне Уголовного кодекса РФ, при этом остается открытым вопрос достаточно ли существующих на сегодняшний день инструментов для регулирования такого специфического направления. Таким образом, мы должны критически относиться к любому доминирующему нарративу, который изображает неизбежное будущее. Мы должны задаваться вопросом, откуда он исходит и чего стремится достичь, а не позволять ему держать нас под прицелом.

Список источников

1. Jacobs J.B., Haberman A. 3D-printed firearms, do-it-yourself guns, & the Second Amendment // *Law & Contemporary Problems*. 2017. V. 80. P. 129.
2. Greenberg A. 3D-Printed gun's blueprints downloaded 100,000 times in Two days (with some help from Kim Dotcom) // *Forbes*. 2013.
3. Gadzhimetov A. New technologies for manufacturing arms and their legal estimation // *Information Innovative Technologies*. 2018. № 1. P. 495–500.
4. Mach M. Streisand Effect in the Context of the Right to be Forgotten // *European Studies*. 2022. V. 9 (1). P. 110–121.
5. Jansen S.C., Martin B. The Streisand effect and censorship backfire. 2015.
6. Castells M., Cardoso G. *The network society*. Oxford: Blackwell, 1996.
7. Yahya F.B. Transmigrants and the Flow of Human Capital: Wither Integration? // *Managing Diversity in Singapore: Policies and Prospects*. 2016. P. 243–264.
8. Zittrain J. *The future of the internet and how to stop it*. Yale University Press, 2008.
9. Slater D. Social relationships and identity online and offline // *Handbook of new media: Social shaping and consequences of ICTs*. 2002. P. 533–546.
10. Turner F. How digital technology found utopian ideology // *Critical cyberculture studies*. 2006. V. 257.
11. Orlikowski W.J. Sociomaterial practices: Exploring technology at work // *Organization studies*. 2007. V. 28 (9). P. 1435–1448.
12. Bump P. How Defense Distributed already upended the world // *The Wire: News from the Atlantic*. 2013.
13. Медведицкова Л.В. Технологии 3D-печати при изготовлении огнестрельного оружия. Проблемы в расследовании преступлений // *Закон и право*. 2019. №. 3. С. 121–124.
14. Кокун А.В. 3D-оружие и перспективы его криминалистического исследования // *Теория и практика судебной экспертизы*. 2017. Т. 12, № 2. С. 34–41.

References

1. Jacobs, J.B. & Haberman, A. (2017) 3D-printed firearms, do-it-yourself guns, & the Second Amendment. *Law & Contemporary Problems*. 80. p. 129.
2. Greenberg, A. (2013) 3D-Printed gun's blueprints downloaded 100,000 times in Two days (with some help from Kim Dotcom). *Forbes*.
3. Gadzhimetov, A. (2018) New technologies for manufacturing arms and their legal estimation. *Information Innovative Technologies*. 1. pp. 495–500.
4. Mach, M. (2022) Streisand Effect in the Context of the Right to be Forgotten. *European Studies*. 9(1). pp. 110–121.
5. Jansen, S.C. & Martin, B. (2015) *The Streisand effect and censorship backfire*.
6. Castells, M. & Cardoso, G. (1996) *The network society*. Oxford: Blackwell.
7. Yahya, F.B. (2016) Transmigrants and the Flow of Human Capital: Wither Integration? *Managing Diversity in Singapore: Policies and Prospects*. pp. 243–264.
8. Zittrain, J. (2008) *The future of the internet and how to stop it*. Yale University Press.

9. Slater, D. (2002) Social relationships and identity online and offline. In: *Handbook of new media: Social shaping and consequences of ICTs*. pp. 533–546.
10. Turner, F. (2006) How digital technology found utopian ideology. *Critical cyberculture studies*. 257.
11. Orlikowski, W.J. (2007) Sociomaterial practices: Exploring technology at work. *Organization studies*. 28(9). pp. 1435–1448.
12. Bump, P. (2013) How Defense Distributed already upended the world. *The Wire: News from the Atlantic*.
13. Medvedickova L. V. (2019) Tekhnologii 3D-pechati pri izgotovlenii ognestrel'nogo oruzhiya. *Problemy v rassledovanii prestuplenij Zakon i pravo*. (3). pp. 121–124.
14. Kokin A. V. (2017) 3D-oruzhie i perspektivy ego kriminalisticheskogo issledovaniya *Teoriya i praktika sudebnoj ekspertizy*. 12(2). pp. 34–41.

Информация об авторе:

Кринецун Максим Германович – кандидат технических наук, научный сотрудник Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: krinmax@gmail.com

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья носит обзорный характер и рассматривает современное состояние 3D-печати оружия, автор не призывает к созданию и распространению оружия, боеприпасов, а также их компьютерных моделей, а также напоминает, что разработка, производство и хранение оружия и его основных частей подлежат лицензированию в соответствии с законодательством России о лицензировании отдельных видов деятельности. Незаконные изготовление, переделка или ремонт огнестрельного оружия, а также незаконное изготовление боеприпасов являются уголовно наказуемыми деяниями.

Information about the author:

Krinitcun Maksim G., Cand.Sc. (Engineering), researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: krinmax@gmail.com

The author declares no conflicts of interests.

The article is a review article and considers the current state of 3D printing of weapons, the author does not call for the creation and distribution of weapons, ammunition, as well as their computer models, and also recalls that the development, production and storage of weapons and their main parts are subject to licensing in accordance with Russian legislation on licensing certain types of activities. The illegal manufacture, alteration or repair of firearms, and the illegal manufacture of ammunition are criminal offences.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023

ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ УГРОЗАМ ХИМИЧЕСКОЙ И БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

COUNTERING THREATS OF CHEMICAL AND BIOLOGICAL NATURE

Научная статья
УДК 53.087.92
doi: 10.17223/7783494/1/9

Полупроводниковые сенсоры насыщенных паров взрывчатых веществ и мультисенсорные системы на их основе

Надежда Кузьминична Максимова¹, Татьяна Дмитриевна Малиновская²,
Евгений Юрьевич Севастьянов³, Евгений Викторович Черников⁴,
Надежда Владимировна Сергейченко⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *nkmax3@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-9365-0824*

² *malintd@yandex.ru*

³ *sese@ngs.ru*

⁴ *evvch192184@gmail.com*

⁵ *edelveisu@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6947-8895*

Аннотация. Разработаны физические принципы и технологические решения для создания малогабаритных сенсоров паров нитросодержащих взрывчатых веществ (ВВ). Определены необходимые нанесенные на поверхность диоксида олова катализаторы. Оптимизированы температуры и длительности циклов нагрева и охлаждения при термоциклировании для обнаружения предельно низких концентраций 20–30 ppb гексогена и 10–15 ppb тринитротолуола. Разработана и реализована мультисенсорная система для селективного детектирования паров ВВ.

Ключевые слова: тринитротолуол, гексоген, концентрация насыщенных паров, тонкие пленки, диоксид олова, катализаторы, сенсоры, мультисенсорная система

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Максимова Н.К., Малиновская Т.Д., Севастьянов Е.Ю., Черников Е.В., Сергейченко Н.В. Полупроводниковые сенсоры насыщенных паров взрывчатых веществ и мультисенсорные системы на их основе // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 60–70. doi: 10.17223/7783494/1/9

Original article
doi: 10.17223/7783494/1/9

Semiconductor sensors of saturated vapors of explosives and multisensor systems based on them

Nadezhda K. Maksimova¹, Tatyana D. Malinovskaya², Evgenii Yu. Sevastyanov³,
Evgenii V. Chernikov⁴, Nadezhda V. Sergeychenko⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *nkmax3@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-9365-0824*

² *malintd@yandex.ru*

³ *sese@ngs.ru*

⁴ *evvch192184@gmail.com*

⁵ *edelveisu@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6947-8895*

Abstract. The paper presents the results of research aimed at developing physical principles and technological solutions for creating original highly sensitive sensors based on thin nanocrystalline films of tin dioxide capable to detect the trace of vapors of nitro – explosives. The sensors were fabricated by DC magnetron sputtering using several photolithography steps. To measure

the parameters of sensors under the influence of saturated vapors of explosives, an original special quartz chamber was made. The resistance R_0 and conductivity G_0 of the films were investigated in clean air, as well as under the influence of trinitrotoluene (TNT) and hexogen (RDX) vapors R_1 (G_1) depending on the operating temperature in the modes of constant and pulsed heating. It has been established that for the detection of traces of TNT and RDX, it is expedient to use doped by antimony SnO_2 : Sb films, with a deposited on the surface three-layer dispersed Au/Pt/Pd catalyst, with platinum electrodes and a heater. A significant increase in the response is observed when the sensors are operated in the experimentally found optimal thermal cycling modes. The processes responsible for the formation of the response can be represented as follows. In the presence of Pt/Pd clusters on the surface of thin nanocrystalline tin dioxide films in the heating cycle at temperatures of $T_1 = 220\text{--}240\text{ }^\circ\text{C}$ (at duration $t_1 = 5\text{ s}$), dissociative adsorption of explosive molecules occurs. Nitrogen dioxide is released, which, in the presence of a catalytic Au layer, is adsorbed on the sensor surface. NO_2 , in turn, is a catalyst for the further decomposition of TNT and, in particular, RDX, contributing to an increase in the density of the negative charge and an increase in the sensor resistance. The maximum response to NO_2 is detected in the cooling cycle at temperatures $T_2 = 70\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$ (at duration $t_2 = 3\text{ s}$). At temperatures above $340\text{ }^\circ\text{C}$, the organic base of the explosive molecule reacts with oxygen atoms adsorbed on the surface of the sensor film, resulting in an increase in the sensor conductivity. These data can be used for selective detection of explosives if a chain of two identical sensors operating in different thermal cycling modes is created. A sign of the presence of explosive vapors in the atmosphere is an increase in the resistance of the sensor operating at a lower temperature and a drop in the resistance of the sensor operating at a higher temperature. When creating a prototype of a multisensor system for detecting explosive vapors, the task was to issue a signal no later than 10 sec from the moment of sampling from a container with TNT granules. It was assumed that the system continuously takes samples, and the incoming air is not specially processed in any way (i.e., it is not cleaned or dried). The logic of the multisensor is implemented in the four-channel bench control program, using an Excel-like system.

Keywords: trinitrotoluene, hexogen, saturated vapor concentration, thin films, tin dioxide, catalysts, sensors, multi-sensor system

Acknowledgments: The study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Maksimova, N.K., Malinovskaya, T.D., Sevastyanov, E.Yu., Chernikov, E.V. & Sergeychenko, N.V. (2023) Semiconductor saturated vapors of explosives sensors and multisensor systems based on them. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 60–70. doi: 10.17223/7783494/1/9 (In Russian).

Введение

С целью противодействия террористической угрозе одной из актуальных современных проблем является разработка экспресс-методов обнаружения взрывчатых веществ, позволяющих определять тип и содержание анализируемого компонента в режиме реального времени без трудоемких операций пробоотбора и пробоподготовки. В данный момент для определения состава газов наиболее широко используются газовая хроматография и оптическая спектрометрия. Эти стационарные качественные аппараты газоаналитической химии дороги и громоздки, а время анализа достаточно велико.

Решение задачи возможно при использовании сенсорных систем, созданных с применением микро- и нанотехнологий, которые позволяют получать миниатюрные, надежные и относительно дешевые датчики и системы. Однако в литературе отсутствуют данные о создании полупроводниковых газовых сенсоров, которые могут быть использованы для детектирования паров нитросодержащих взрывчатых веществ, отличающихся низкими значениями давления насыщенных паров. Согласно приведенным в работе [1] данным, при комнатной температуре давления $P_V = (1\text{--}1,5) \times 10^{-2}$, 2×10^{-5} ррт для тринитротолуола (ТНТ) и гексогена (ГГ). Принцип действия полупроводниковых сенсоров заключается в следующем [2]. В атмосфере на поверхности тонких пленок SnO_2 , WO_3 и других металлооксидов происходит хемо-

сорбция кислорода. Молекула кислорода захватывает электрон из зоны проводимости полупроводника и заряжается отрицательно. В приповерхностной области образуется область объемного заряда шириной d_0 , обедненная электронами, проводимость G полупроводниковой пленки снижается. Молекулярная форма кислорода O_2 преобладает при низких температурах $<473\text{ K}$. В области более высоких температур кислород адсорбируется в форме O^- . При адсорбции всех восстановительных газов происходит их окисление предварительно хемосорбированным атомарным кислородом, удаление которого с поверхности сопровождается снижением сопротивления R полупроводника. При адсорбции молекулы окислительного газа (например, диоксида азота) происходит захват электрона, плотность отрицательного заряда растет, наблюдается дополнительное увеличение R . В эксперименте для каждого газа наблюдаются особенности, обусловленные спецификой реакций, протекающих на поверхности реального полупроводника и определяющих эксплуатационные параметры сенсоров.

При детектировании сложных молекул, к которым относятся ВВ, необходимо обеспечить их разложение до более простых составляющих, которые способны взаимодействовать с поверхностью и влиять на плотность заряда и проводимость полупроводников. Согласно экспериментальным данным [3, 4] и квантовомеханическим расчетам [5], в присут-

ствии Pt катализаторов наиболее возможными продуктами окисления нитросодержащих веществ являются NO_2 и с меньшей вероятностью NO . Диссоциация нитроцеллюлозы в присутствии NiO приводит к генерации NO_2 [6]. При полном окислении (горении) имеет место образование NO_2 , CO_2 и H_2O . В работах [8–13] рассматриваются механизмы термического разложения нитросоединений разного состава с принципиальной возможностью образования трех оксидов азота: NO_2 , NO , N_2O . В [12] показано, что при термическом разложении ВВ типа ТНТ происходят реакции, способствующие разрыву связи $\text{C}-\text{NO}_2$ с выделением прежде всего NO_2 .

Литературные данные и результаты наших исследований [2] свидетельствуют о том, что в воздушной атмосфере чувствительность полупроводниковых сенсоров к NO на один-два порядка ниже, чем к NO_2 , поскольку молекулы NO сначала доокисляются до NO_2 и только потом адсорбируются на поверхности. Молекулы N_2O являются инертными, и возможность их хемосорбции на поверхности полупроводников в известной нам литературе не рассматривается. В случае сверхнизких концентраций ВВ при давлении насыщенных паров наши сенсоры способны детектировать только NO_2 .

Необходимо обеспечить условия, при которых на поверхности нагретого до рабочей температуры сенсора будет происходить выделение диоксида азота. Молекулы NO_2 являются окислителями и способствуют увеличению сопротивления сенсоров, в то время как прочие составляющие продуктов диссоциации ВВ (например, толуол) будут восстановителями и приведут к снижению R .

В настоящей работе выполнены исследования, направленные на создание оригинальных миниатюрных сенсоров насыщенных паров взрывчатых веществ на основе тонких пленок диоксида олова, полученных с использованием сочетания методов магнетронного напыления и микроэлектронной технологии. Изучены характеристики датчиков в зависимости от типа катализаторов на поверхности полупроводника, рабочей температуры в режимах постоянного и импульсного нагрева. Определены принципы, позволившие разработать мультисенсорную систему для детектирования паров ВВ с повышенной селективностью при устойчивости по отношению к парам воды.

Материалы и методы

В результате анализа литературных данных [3–13] и выполненных нами ранее экспериментальных исследований [2] определены типы металлооксидных пленок, их состав и толщина, типы примесей в объеме полупроводника и нанесенных на поверх-

ность катализаторов, которые могут быть использованы для создания сенсоров паров ВВ. Толщины всех пленок составляют около 100 нм. Предполагаемый механизм сенсбилизации пленки видится в поиске катализаторов диссоциации молекулы ВВ с выделением нитрогрупп (NO_2) и катализаторов, обеспечивающих чувствительность к продуктам реакции разложения: нитрогруппам или органическому остову молекулы. При этом обеспечение чувствительности к нитрогруппам представляется более предпочтительным, чем к органическому остову молекулы, так как, во-первых, мог бы использоваться опыт, полученный в ходе разработки сенсоров диоксида азота [2], во-вторых, чувствительность сенсоров к диоксиду азота является наиболее высокой из всего спектра исследуемых нами газов. В-третьих, отклик на пары ВВ был бы обратным по отношению к восстановительной составляющей (с ростом концентрации NO_2 проводимость сенсора падает), что послужило бы дополнительным фактором повышения селективности. Исходя из высказанных соображений, основное внимание было уделено исследованию характеристик пленок диоксида олова с нанесенными на поверхность дисперсными катализаторами Pt/Pd, которые будут способствовать диссоциации ТНТ и ГГ [3–5]. Третьим сверхтонким слоем напыляли Au, являющийся активным катализатором детектирования NO_2 . Ранее [2] было показано, что в случае пленок Pt/Pd/ SnO_2 : Sb отклик на диоксид азота отсутствует и появляется только после нанесения третьего дисперсного слоя Au.

Пленки SnO_2 , легированные примесью сурьмы, были получены в магнетроне А-500 (Edwards) распылением на постоянном токе в кислородно-аргонной плазме мишени из сплава Sn+0,5 ат. % Sb. Примесь сурьмы создает в диоксиде олова донорные центры и способствует снижению сопротивления пленок до значений 1–10 МОм в рабочем режиме, что необходимо при разработке сенсоров с низким уровнем шумов. В качестве подложки использовали пластины сапфира толщиной 150 мкм. Детальное описание технологии напыления пленок и изготовления сенсоров, собранных в корпуса ТО-8, приведено в работах [2, 14–16]. На одной подложке диаметром 30 мм получали до 500 сенсоров размером $0,7 \times 0,7$ мм (с площадью чувствительного слоя $0,3 \times 0,3$ мм²) с воспроизводимыми характеристиками. Схематические изображения чувствительного элемента и фотографии образцов сенсоров показаны на рис. 1, 2.

Измеряли сопротивление R_0 и проводимость G_0 пленок в чистом воздухе, а также эти параметры при воздействии паров ТНТ и ГГ R_1 (G_1) в зависимости от рабочей температуры в режимах постоянного и

импульсного нагрева. Описание методики измерения, а также принципы действия тонкопленочных газовых сенсоров детально представлены в работах [2, 14–17]. За адсорбционный отклик на ВВ принимали отношение G_0/G_1 , за время отклика – t_r – время

установления $0,9 G_{ст}$, где $G_{ст}$ – стационарное значение проводимости. Для измерения характеристик сенсоров при воздействии насыщенных паров ВВ была изготовлена оригинальная специальная кварцевая камера, представленная на рис. 3.

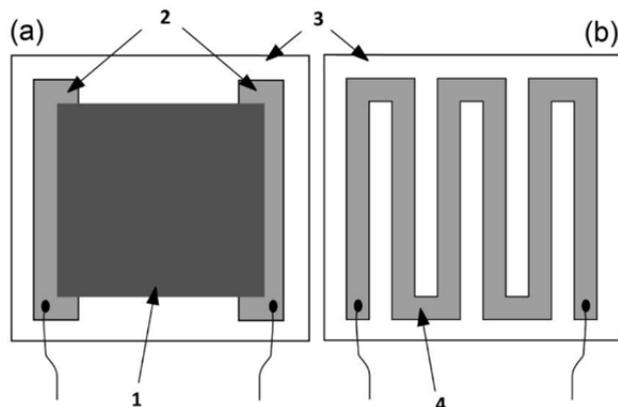


Рис. 1. Схематическое изображение малогабаритного чувствительного элемента: 1 – чувствительный элемент; 2 – платиновые электроды; 3 – подложка; 4 – нагреватель

Fig. 1. Schematic representation of the sensitive element from the side of (a) semiconductor SnO_2 layer and (b) heater: 1 – sensitive element; 2 – Pt electrodes; 3 – sapphire substrate; 4 – heater

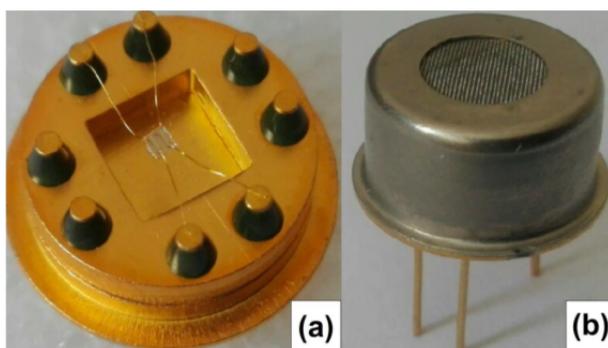


Рис. 2. Фото полупроводникового сенсора в корпусе (a) и сенсора с защитным колпачком (b)

Fig. 2. Photos of (a) sensor assembled into TO-8 corps and (b) sensor with a protective cap



Рис. 3. Устройство для прокачки воздуха, очищенного с помощью цеолитового фильтра через измерительную камеру (a) и измерительная камера (b)

Fig. 3. Device for pumping air purified with a zeolite filter through the measuring chamber (a), and the measuring chamber (b)

С помощью подвижного притертого кварцевого затвора с отверстием камера разделена на две части. В верхней части камеры размещен один образец, на дно нижней части насыпается целевое вещество. В зависимости от положения затвора нижняя часть камеры либо изолировалась от верхней части, либо соединялась с верхней частью через отверстие в затворе. Перед началом измерения обе части камеры продувались чистым сухим воздухом, затем затвор закрывался, а измерительная камера герметизировалась, т.е. патрубки измерительной камеры, через которые осуществлялся продув, перекрывались. В измерительной камере во время измерения отсутствовали искусственно созданные потоки воздуха – доступ молекул вещества к сенсору происходил диффузно. Как правило, после этих операций сопротивление сенсоров снижалось, по-видимому, за счет адсорбции на поверхности пленок молекул, десорбирующихся с поверхности камеры. Это могут быть молекулы воды, а также других загрязняющих атмосферу частиц, которые обычно играют роль восстановителей. Сопротивление сенсоров достигает постоянного значения в течение 15–20 мин. Предполагали, что за это время в нижней части камеры устанавливалось давление насыщенных паров целевых веществ. Затем затвор передвигали в положение, соответствующее доступу паров целевого вещества к поверхности сенсора. Через 25–30 с сопротивление сенсора начинало изменяться под влиянием адсорбции паров ВВ. После завершения измерений обе части камеры прокачивали чистым осушенным воздухом. В качестве целевых веществ использовали порошок с вкраплениями более крупных частиц тринитротолуола и мелкокристаллический гексоген.

Результаты и обсуждение

Характеристики сенсоров, предназначенных для детектирования ВВ

На основе предварительного исследования температурных зависимостей отклика на ВВ в режимах постоянного и импульсного нагрева сделан вывод о необходимости использования режима термоциклирования. С целью оптимизации режима импульсного нагрева были выполнены исследования влияния температуры и длительности циклов нагрева и охлаждения на значения отклика сенсоров. На рис. 4 представлены типичные профили проводимость–время (ППВ, СТР) в течение одного термоцикла сенсоров в чистом воздухе и при воздействии гексогена.

В первые 0,4 с цикла нагрева происходит рост проводимости в чистом воздухе (рис. 4, кривая 1), причем имеет место переходной процесс, связанный, прежде всего, с инерционностью нагрева чувствительного элемента, находящегося на другой стороне подложки. Затем устанавливается постоянное значение G , соответствующее температуре 240 °С. После снижения температуры в цикле охлаждения проводимость уменьшается в течение 1,9 с и вновь устанавливается практически постоянное значение G , соответствующее температуре 100 °С. В присутствии гексогена проводимость снижается в течение всего термоцикла. Резкого изменения формы ППВ под действием ГГ не происходит, поскольку сенсор работает при достаточно низких температурах и при воздействии сверхнизких концентраций вещества.

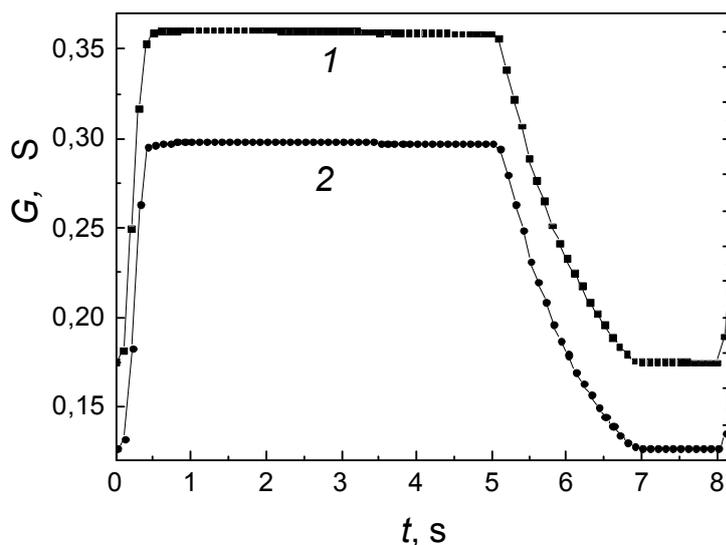


Рис. 4. Профили проводимость – время в одном цикле нагрева и охлаждения для сенсора Au/Pt/Pd/SnO₂: Sb в режиме термоциклирования: $T_1 = 240$ °С ($t_1 = 5$ с), $T_2 = 100$ °С ($t_2 = 3$ с) в чистом воздухе (кривая 1) и при воздействии гексогена (кривая 2)

Fig. 4. Conductivity – time profiles in one heating and cooling cycle for an Au/Pt/Pd/SnO₂: Sb sensor in thermal cycling mode: $T_1 = 240$ °С ($t_1 = 5$ s), $T_2 = 100$ °С ($t_2 = 3$ s) in pure air (1) and with feeding RDX (2)

Анализ экспериментальных данных показал, что более высокий отклик на воздействие целевых веществ наблюдается в конце цикла охлаждения $G_0/G_1(T_2)$.

Зависимости откликов от времени после подачи пробы при различных режимах термоциклирования представлены на рис. 5 при воздействии ТНТ, на рис. 6 – при воздействии ГГ.

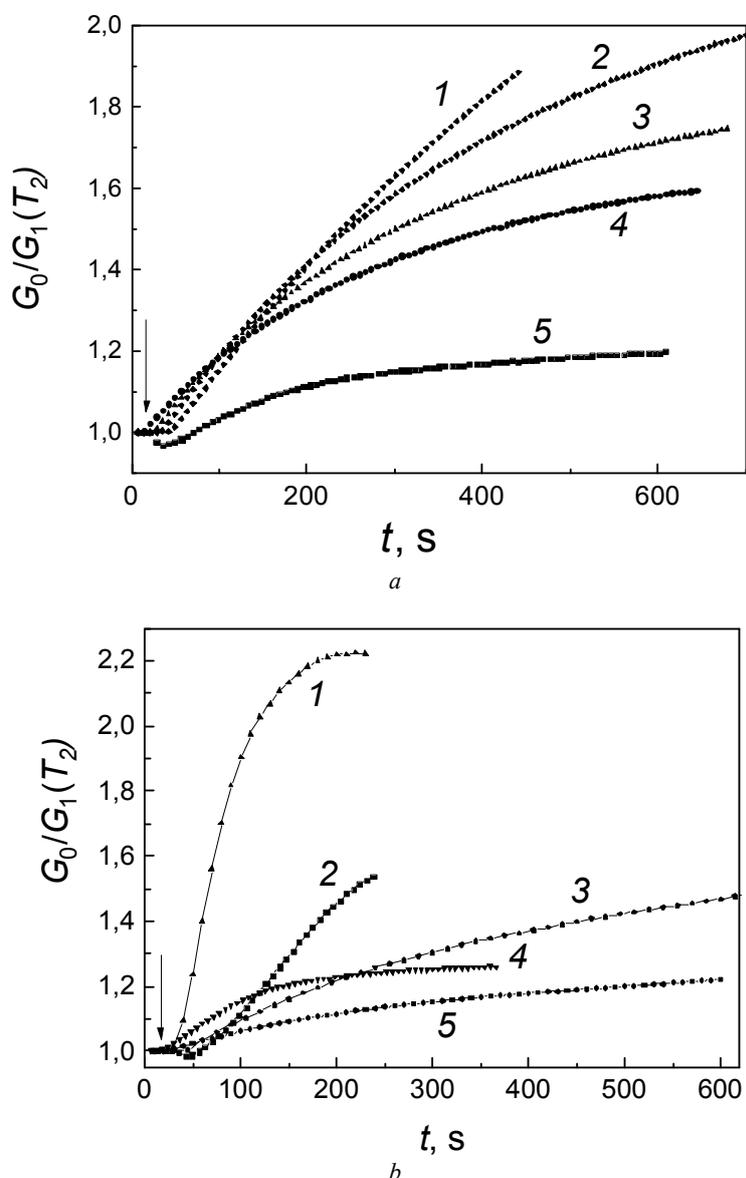


Рис. 5. Временные зависимости отклика сенсора $G_0/G_1(T_2)$ на ТНТ при различных температурах в цикле нагрева (а) и длительностях циклов нагрева t_1 и охлаждения t_2 (б).

а: $t_1 = 2$ с, $T_2 = 100$ °С ($t_2 = 5$ с).

Температура в цикле нагрева T_1 , °С: 220 (1, 2); 240 (3); 250 (4); 300 (5).

б: $T_1 = 240$ °С, $T_2 = 100$ °С.

Длительности цикла нагрева t_1 , с: 5 (1); 2 (2); 10 (3); 3 (4); 3 (5).

Длительности цикла охлаждения t_2 , с: 3 (1); 5 (2); 5 (3); 3 (4); 7 (5)

Fig. 5. Time dependences of the response $G_0/G_1(T_2)$ to TNT at different temperatures in the heating cycle (а) and durations of heating cycles t_1 and cooling t_2 (б).

а: $t_1 = 2$ s, $T_2 = 100$ °С ($t_2 = 5$ s).

The temperatures in the heating cycle T_1 , °С: 220 (1, 2); 240 (3); 250 (4); 300 (5).

б: $T_1 = 240$ °С, $T_2 = 100$ °С.

The durations of heating cycles t_1 , s: 5 (1); 2 (2); 10 (3); 3 (4); 3 (5).

The durations of cooling cycles t_2 , s: 3 (1); 5 (2); 5 (3); 3 (4); 7 (5)

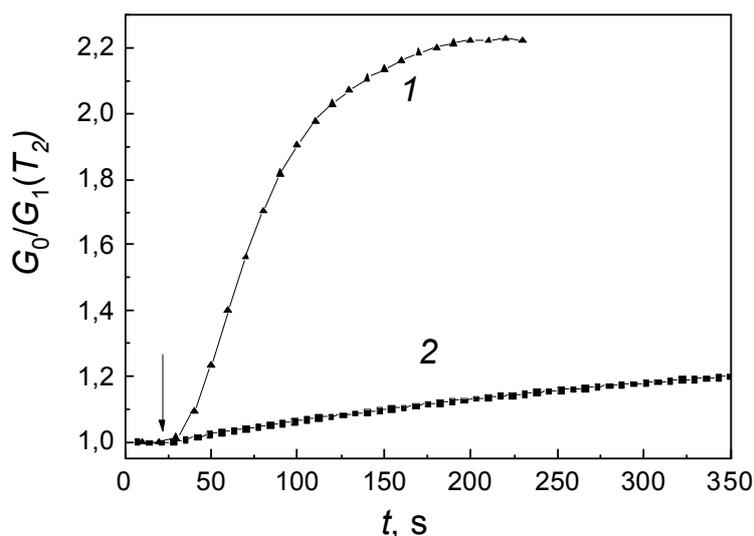


Рис. 6. Временные зависимости отклика $G_0/G_1(T_2)$ сенсора на гексоген при температурах $T_1 = 240\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ в зависимости от длительностей циклов нагрева и охлаждения: $t_1 = 5\text{ с}$, $t_2 = 3\text{ с}$ (1); $t_1 = 2\text{ с}$, $t_2 = 5\text{ с}$ (2)

Fig. 6. Time dependences of the response $G_0/G_1(T_2)$ to RDX at temperatures $T_1 = 240\text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$ in relation to the durations of heating and cooling cycles: $t_1 = 5\text{ s}$, $t_2 = 3\text{ s}$ (1); $t_1 = 2\text{ s}$, $t_2 = 5\text{ s}$ (2)

Доступ паров ВВ к сенсору обычно открыт после 35 с от начала записи данных (показано стрелкой). Можно видеть, что отклик фиксируется примерно через 25–30 с после начала доступа паров ВВ в верхнюю часть камеры, в которой размещен сенсор. По-видимому, это время, необходимое для диффузии молекул к поверхности сенсора. Проводимость сенсора снижается, сопротивление растет, что соответствует действию окислителя. Изменение температуры в цикле охлаждения в диапазоне $T_2 = 70\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$ при длительности $t_2 = 5\text{ с}$ не оказывает существенного влияния на значения $G_0/G_1(T_2)$. Наиболее важную роль играют температура и длительности цикла нагрева. Максимальные значения отклика на ТНТ и ГГ наблюдаются при $T_1 = 220\text{--}240\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 5, а, 1–3), повышение температуры T_1 до $300\text{ }^\circ\text{C}$ способствует резкому снижению отклика (рис. 5, а, 5).

В табл. 1 приведены зависимости отклика на ТНТ и ГГ от соотношения длительностей циклов t_1 и t_2 . Очевидно, что существуют оптимальные значения $t_1 = 5\text{ с}$ и $t_2 = 3\text{ с}$, при которых имеет место резкое увеличение $G_0/G_1(T_2)$. Интересно, что в оптимальном режиме термоциклирования наблюдаются более быстрый рост отклика и выход сигнала на насыщение в течение около 200 с после доступа к сенсору паров ВВ (рис. 5, б; рис. 6, кривые 1).

Процессы, ответственные за формирование отклика, можно представить следующим образом.

В цикле нагрева происходит диссоциативная адсорбция молекул ВВ на поверхности тонких нанокристаллических пленок диоксида олова. В присутствии дисперсных катализаторов Pt/Pd имеет место выделение диоксида азота, который адсорбируется на поверхности диоксида олова и способствует повышению плотности отрицательного заряда и росту сопротивления сенсора.

Таблица 1

Значения отклика в конце цикла охлаждения на тринитротолуол и гексоген при различных длительностях циклов нагрева t_1 и охлаждения t_2 . Температуры циклов нагрева $T_1 = 240\text{ }^\circ\text{C}$ и охлаждения $T_2 = 100\text{ }^\circ\text{C}$. $G_0/G_1(T_2)$ оценивались после начала действия паров вещества через 140 и 110 с для ТНТ и ГГ соответственно

t_1	t_2	$G_0/G_1(T_2)$	
		ТНТ	ГГ
2	5	1,25	1,15
5	3	2,12	1,97
5	7	1,17	1,12
7	5	1,20	1,15
3	5	1,27	1,21
3	3	1,21	1,15

Максимальный отклик детектируется в цикле охлаждения, что соответствует полученным ранее [2] данным, согласно которым максимальные значения отклика на NO_2 наблюдаются при температурах 170–190 °С, причем важную роль играет наличие золота в каталитическом слое. Рост отклика по мере увеличения времени воздействия паров ВВ, возможно, обусловлен инерционностью заполнения центров адсорбции и разложения молекул ВВ, а также адсорбции NO_2 при сверхнизких давлениях насыщенных паров целевых веществ. Кроме того, как известно из литературных данных [12], диоксид азота также является катализатором разложения молекул ВВ, содержащих азот. Совокупность перечисленных эффектов обеспечивает высокие пороги чувствительности (на уровне 20 ppb в случае гексогена и 10–15 ppb в случае тринитротолуола) при использовании режима термоциклирования. В случае ГГ целесообразно использовать повышенную до $T_2 = 100$ °С температуру в цикле охлаждения. Отклики сенсоров уверенно фиксируются через 1–1,5 мин после по-

ступления паров к поверхности полупроводника и через 5 мин составляют 2,12 и 1,97 для ТНТ и ГГ.

Особый интерес представляют результаты исследования отклика сенсоров на воздействие ВВ при высоких температурах 350–370 °С в цикле нагрева (рис. 7, 2). Видно, что в этих условиях через 20–40 с после доступа вещества к сенсору сопротивление снижается и только через 45–50 с сопротивление незначительно растет, однако значения $G_0/G_1(T_2)$ остаются более низкими, чем при $T_1 < 300$ °С (рис. 7, 1). Высокие температуры способствуют преимущественной десорбции молекул NO_2 с поверхности диоксида олова, и формируется отклик на восстановительные составляющие паров ВВ. Эти данные могут быть использованы для селективного обнаружения взрывчатых веществ, если создать цепочку из двух одинаковых сенсоров, работающих в разных режимах термоциклирования. Разные знаки отклика двух сенсоров будут однозначно свидетельствовать о появлении в воздухе паров ТНТ или ГГ.

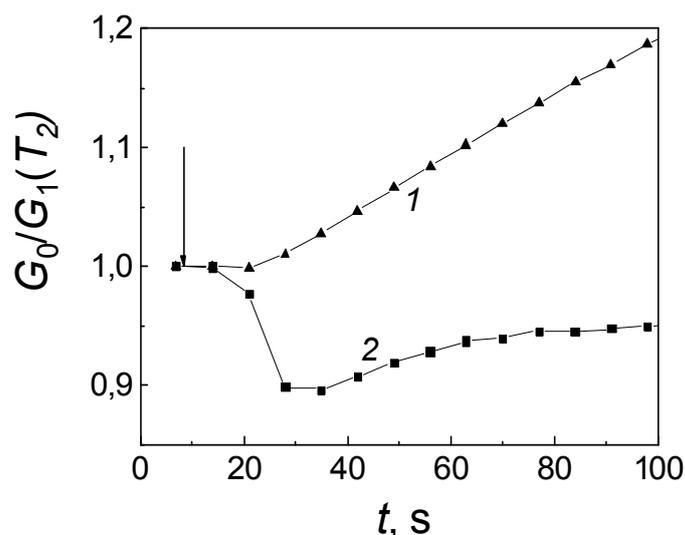


Рис. 7. Временные зависимости отклика $G_0/G_1(T_2)$ на ТНТ при различных температурах в цикле нагрева T_1 , °С: 240 (1), 350 (2). Режимы термоциклирования: T_1 ($t_1 = 2$ с), $T_2 = 100$ °С ($t_2 = 5$ с)

Fig. 7. Time dependences of the response $G_0/G_1(T_2)$ to TNT at different temperatures in heating cycle T_1 , °С: 240 (1), 350 (2)

Применение сенсоров ВВ в мультисенсорной системе

С целью демонстрации возможности использования полупроводниковых сенсоров в мультисенсорных системах детектирования паров ВВ был создан прототип такой системы. Ставилась задача обнаружения паров тринитротолуола в воздухе, при этом результат анализа система должна выдавать не позже 10 с от момента забора пробы из емкости с гранулами тринитротолуола. При этом предполагалось, что система ведет отбор проб непрерывно, а забира-

емый воздух никак специально не обрабатывается (т.е. не очищается и не сушится). Прототип системы должен быть сигнализатором, т.е. выдавать сигнал «Да», если в емкости для проб находится тринитротолуол, и «Нет» в других случаях. Такие требования привели к необходимости пересмотреть режим работы сенсоров. Так как для детектирования паров ВВ необходимо хотя бы 2–3 термоцикла, то при длительности температурного цикла 5–10 с было бы невозможным получить быстрый ответ. Отклик в таком режиме несколько ниже, чем в режимах с

применением термоциклирования. Тем не менее такой режим имеет ряд преимуществ, важных с точки зрения практического решения поставленной задачи: увеличивается быстродействие, уменьшается влияние температуры и теплопроводности воздуха, сигнал, получаемый с периодичностью 10 Гц, можно подвергнуть фильтрации, что позволит снизить соотношение сигнал/шум.

Интересно отметить, что отклик при более высоких температурах становится меньше 1, т.е. меняет знак, что согласуется с данными в режиме термоциклирования. Сенсор реагирует на пары ВВ при повышенных рабочих температурах 250–270 °С, как на восстановитель (сопротивление снижается), а при низких температурах 190–210 °С – как на окислитель (сопротивление растет). Важно, что в реальных условиях, когда возможно изменение влажности ат-

мосферы RH , сопротивление изученных сенсоров при увеличении RH во всем диапазоне рабочих температур снижается, поскольку пары воды являются восстановителем [2], т.е. значение $G_0/G_1 < 1$. Таким образом, прототип мультисенсорной системы, селективно реагирующей на пары ВВ в условиях меняющейся влажности, можно реализовать на двух однотипных сенсорах, работающих при различных температурах. Алгоритм работы такой мультисенсорной системы представлен в табл. 2, где dG_{S1}/dt и dG_{S2}/dt являются производными проводимости по времени для сенсоров, работающих при низких 190–210 °С (S_1) и высоких 250–270 °С (S_2) температурах. Их регистрация позволяет обнаруживать динамическое изменение параметров среды, δ_1 и δ_2 – пороговые константы, близкие к 0, предназначенные для снижения вероятности ложных срабатываний.

Таблица 2

Интерпретация изменения проводимости сенсоров мультисенсорной системы, состоящей из двух сенсоров: S_1 (рабочая температура 190–210 °С) и S_2 (рабочая температура 250–270 °С)

dG_{S1}/dt	dG_{S2}/dt	Сигнал	Комментарий
$> \delta_1$	$> \delta_2$	«Нет»	Влажность растет
$> \delta_1$	$< \delta_2$	«Нет»	Восстановление после паров ВВ
$< \delta_1$	$> \delta_2$	«Да»	Пары ВВ обнаружены
$< \delta_1$	$< \delta_2$	«Нет»	Влажность падает

Прототип мультисенсорной системы был реализован на базе 4-канального измерительного стенда. Логика работы реализована в программе управления стендом с помощью Excel-подобной системы [17]. Алгоритм в данном случае выбирался из принципа простоты и реализуемости в программе управления стендом. Возможно также применение и других методов обработки информации, например, линейаризации с применением псевдообратных матриц, искусственных нейронных сетей, статистических методов и т.п.

Заключение

Исследования показали, что для создания малогабаритных сенсоров, предназначенных для детектирования сверхнизких концентраций насыщенных паров ТНТ и ГГ, целесообразно использовать тонкие пленки диоксида олова, легированные сурьмой, с нанесенным на поверхность трехслойным дисперсным катализатором $Au/Pt/Pd/SnO_2: Sb$, с платиновыми электродами и нагревателем. Сенсоры получали методом магнетронного напыления на постоянном токе с применением нескольких операций фотолитографии.

Существенное повышение отклика наблюдается при работе сенсоров в найденных экспериментально оптимальных режимах термоциклирования. В присутствии дисперсных катализаторов Pt/Pd в цикле нагрева при $T_1 = 220–240$ °С ($t_1 = 5$ с) происходит

диссоциативная адсорбция молекул ВВ на поверхности тонких нанокристаллических пленок диоксида олова. Наблюдается рост сопротивления сенсоров, свидетельствующий о повышении плотности отрицательного заряда. Следовательно, имеет место выделение диоксида азота, который при наличии каталитического слоя Au адсорбируется на поверхности сенсора. NO_2 , в свою очередь, является катализатором дальнейшего разложения ТНТ и в особенности ГГ, способствуя увеличению отклика. Максимальный отклик на NO_2 детектируется в цикле охлаждения при температурах $T_2 = 70–100$ °С ($t_2 = 3$ с).

При температуре выше 340 °С органическая основа молекулы (возможно, толуол) вступает в реакцию с атомами кислорода, адсорбированными на поверхности сенсорной пленки, что приводит к росту проводимости сенсора. Таким образом, признаком наличия паров ВВ в атмосфере является рост сопротивления сенсора, работающего при более низкой температуре, и падение сопротивления сенсора, работающего при более высокой температуре. Установленные закономерности положены в основу разработанной мультисенсорной системы для детектирования насыщенных паров 20–30 ppb гексогена и 10–15 ppb тринитротолуола с временем отклика 3–5 с и с повышенной селективностью при устойчивости по отношению к парам воды.

Список источников

- Moore D.S. Recent Advances in Trace Explosives Detection Instrumentation // *Sensing and Imaging International Journal*. 2007. № 8. P. 9–38. DOI: 10.1007/s11220-007-0029-8
- Максимова Н.К., Севастьянов Е.Ю., Сергейченко Н.В., Черников Е.В. Полупроводниковые тонкопленочные газовые сенсоры. Томск : Изд-во НТЛ, 2016. 164 с.
- Content W.C., Trogler S., Sailor M.J. Detection of nitrobenzene, DNT and TNT vapors by quenching of porous silicon photoluminescence // *Chemistry—A European Journal*. 2000. V. 6(12). P. 2205–2213. DOI: 10.1002/1521-3765(20000616)6:12<2205::aid-chem2205>3.0.co;2-a
- Taha Y.M., Odame-Ankrah Ch., Osthoff H. Real-time vapor detection of nitroaromatic explosives by catalytic thermal dissociation blue diode laser cavity ring-down spectroscopy // *Chemical Physics Letters*. 2013. V. 582. P. 15–20. DOI: 10.1016/j.cplett.2013.07.040
- Lenz A., Pohl A., Ojamae L., Persson P. Computational study of the catalytic effect of platinum on the decomposition of DNT // *International Journal of Quantum Chemistry*. 2012. V. 112. P. 1852–1858. DOI: 10.1002/qua.23164
- Wei W., Cui B., Jiang X., Lu L. The catalytic effect of NiO on thermal decomposition of nitrocellulose // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2010. V. 102. P. 863–866. DOI: 10.1007/s10973-010-0695-y
- Shu Yu., Yin M., Xiong Yi., Du J. Molecular Dynamics Simulation on Thermal Decomposition Mechanism of 4-Amino-3,5-Dinitro Pyrazole // *Theory and Practice of Energetic Materials : Proceedings of the International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics (Kunming, China, Sept. 22–25, 2009)*. V. 8. Science Press, 2009. P. 531–536.
- Amrousse R., Fujisato K., Habu H., Bachar A. Catalytic decomposition of ammonium dinitramide (ADN) as high energetic material over CuO-based catalysts // *Catalysis Science and Technology*. 2013. V. 3. P. 2614–2619. DOI: 10.1039/c3cy00214d
- Lobbecke S., Keicher T., Pfeil A. The New Energetic Material Ammonium Dinitramide and Its Thermal Decomposition. // *Solid State Ionics*. 1997. V. 101–103 (Pt. 2). P. 945–951. DOI: 10.1016/S0167-2738(97)00215-4
- Brill T.B., James K.J. Report. 1993. (Order No. AD-A279600). P. 144.
- Brill T.B., James K.J. Thermal decomposition of energetic materials 62. Reconciliation of the kinetics and mechanisms of TNT on the time scale from microseconds to hours // *Journal of Physical Chemistry*. 1993. V. 97. P. 8759–8763. DOI: 10.1021/j100136a018
- Furman D., Kosloff R., Dubnikova F., Zybin S.V., Goddard W.A., Rom N., Hirshberg B., Zeiri Y. Decomposition of Condensed Phase Energetic Materials: Interplay between Uni- and Bimolecular Mechanisms // *Journal of the American Chemical Society*. 2014. V. 136. P. 4192–4200. DOI: 10.1021/ja410020f
- Irikura K.K. Aminoxyl (Nitroxyl) Radicals in the Early Decomposition of the Nitramine RDX // *The Journal of Physical Chemistry. A*. 2013. V. 117. P. 2233–2241. DOI: 10.1021/jp310247z
- Гаман В.И., Севастьянов Е.Ю., Максимова Н.К., Алмаев А.В., Сергейченко Н.В. Характеристики полупроводниковых резистивных сенсоров водорода при работе в режиме термодублирования // *Известия вузов. Физика*. 2013. Т. 56, № 12. С. 96–102.
- Maksimova N.K., Almaev A.V., Sevastyanov E.Y., Potekaev A.I., Chernikov E.V., Sergeychenko N.V., Korusenko P.M., Nesov S.N. Effect of Additives Ag and Rare Earth Elements Y and Sc on the Properties of Hydrogen Sensors Based on Thin SnO₂ Films during Long Term Testing // *Coatings*. 2019. V. 9. P. 423. DOI: 10.3390/coatings9070423
- Maksimova N.K., Sevastyanov E.Y., Chernikov E.V., Korusenko P.M., Nesov S.N., Kim S.V., Biryukov A.A., Sergeychenko N.V., Davletkildiev N.A., Sokolov D.V. Sensors based on tin dioxide thin films for the detection of pre-explosive hydrogen concentrations. // *Sensors and Actuators: B*. 2021. V. 341. P. 130020. DOI: 10.1016/j.snb.2021.130020
- Севастьянов Е.Ю., Максимова Н.К. Программа управления четырехканальным измерительным стендом для полупроводниковых газовых сенсоров. Патент России. № 2019614627. 09.04.2019 г.

References

- Moore, D.S. (2007) Recent Advances in Trace Explosives Detection Instrumentation. *Sensing and Imaging International Journal*. 8. pp. 9–38. DOI: 10.1007/s11220-007-0029-8
- Maksimova, N.K., Sevastyanov, E.Yu., Sergeychenko, N.V. & Chernikov, E.V. (2016) *Semiconductor thin-film gas sensors*. Tomsk: NTL Publishing House.
- Content, W.C., Trogler, S. & Sailor, M.J. (2000) Detection of nitrobenzene, DNT and TNT vapors by quenching of porous silicon photoluminescence. *Chemistry—A European Journal*. 6. 12. pp. 2205–2213. DOI: 10.1002/1521-3765(20000616)6:12<2205::aid-chem2205>3.0.co;2-a
- Taha, Y.M., Odame-Ankrah, Ch. & Osthoff, H. (2013) Real-time vapor detection of nitroaromatic explosives by catalytic thermal dissociation blue diode laser cavity ring-down spectroscopy. *Chemical Physics Letters*. 582. pp. 15–20. DOI: 10.1016/j.cplett.2013.07.040
- Lenz, A., Pohl, A., Ojamae, L. & Persson, P. (2012) Computational study of the catalytic effect of platinum on the decomposition of DNT. *International Journal of Quantum Chemistry*. 112. pp. 1852–1858. DOI: 10.1002/qua.23164
- Wei, W., Cui, B., Jiang, X. & Lu, L. (2010) The catalytic effect of NiO on thermal decomposition of nitrocellulose. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 102. pp. 863–866. DOI: 10.1007/s10973-010-0695-y
- Shu, Yu., Yin, M., Xiong, Yi. & Du, J. (2009) Molecular Dynamics Simulation on Thermal Decomposition Mechanism of 4-Amino-3,5-Dinitro Pyrazole. In: *Theory and Practice of Energetic Materials : Proceedings of the International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics (Kunming, China, Sept. 22-25, 2009)*. 8. Science Press.
- Amrousse, R., Fujisato, K., Habu, H. & Bachar, A. (2013) Catalytic decomposition of ammonium dinitramide (ADN) as high energetic material over CuO-based catalysts. *Catalysis Science and Technology*. 3. pp. 2614–2619. DOI: 10.1039/c3cy00214d
- Lobbecke, S., Keicher, T. & Pfeil, A. (1997) The New Energetic Material Ammonium Dinitramide and Its Thermal Decomposition. *Solid State Ionics*. 101-103(2). pp. 945–951. DOI: 10.1016/S0167-2738(97)00215-4
- Brill, T.B. & James, K.J. (1993) Report. (Order No. AD-A279600).

11. Brill, T.B. & James, K.J. (1993) Thermal decomposition of energetic materials 62. Reconciliation of the kinetics and mechanisms of TNT on the time scale from microseconds to hours. *Journal of Physical Chemistry*. 97. pp. 8759–8763. DOI: 10.1021/j100136a018
12. Furman, D., Kosloff, R., Dubnikova, F., Zybin, S.V., Goddard, W.A., Rom, N., Hirshberg, B. & Zeiri, Y. (2014) Decomposition of Condensed Phase Energetic Materials: Interplay between Uni- and Bimolecular Mechanisms. *Journal of the American Chemical Society*. 136. pp. 4192–4200. DOI: 10.1021/ja410020f
13. Irikura, K.K. (2013) Aminoxyl (Nitroxyl) Radicals in the Early Decomposition of the Nitramine RDX. *The Journal of Physical Chemistry. A*. 117. pp. 2233–2241. DOI: 10.1021/jp310247z
14. Gaman, V.I., Sevast'yanov, E.Yu., Maksimova, N.K., Almaev, A.V. & Sergeichenko, N.V. (2014) Characteristics of the semiconductor resistive hydrogen sensors in the thermo-cyclic operation mode. *Russian Physics Journal*. 5(12). pp. 1427–1434. DOI: 10.1007/s11182-014-0195-9
15. Maksimova, N.K., Almaev, A.V., Sevastyanov, E.Y., Potekaev, A.I., Chernikov, E.V., Sergeychenko, N.V., Korusenko, P.M. & Nesov, S.N. (2019) Effect of Additives Ag and Rare Earth Elements Y and Sc on the Properties of Hydrogen Sensors Based on Thin SnO₂ Films during Long Term Testing. *Coatings*. 9. pp. 423. DOI: 10.3390/coatings9070423
16. Maksimova, N.K., Sevastyanov, E.Y., Chernikov, E.V., Korusenko, P.M., Nesov, S.N., Kim, S.V., Biryukov, A.A., Sergeychenko, N.V., Davletkildiev, N.A. & Sokolov, D.V. (2021) Sensors based on tin dioxide thin films for the detection of pre-explosive hydrogen concentrations. *Sensors and Actuators: B*. 341. pp. 130020. DOI: 10.1016/j.snb.2021.130020
17. Sevastyanov, E.Yu. & Maksimova, N.K. (2019) Control program for a four-channel measuring stand for semiconductor gas sensors. Patent of Russia. No. 2019614627. 09.04.2019.

Информация об авторах:

Максимова Надежда Кузьминична – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: nkmax3@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-9365-0824

Малиновская Татьяна Дмитриевна – доктор химических наук, профессор, заведующая лабораторией оптических материалов и покрытий СФТИ Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: malintd@yandex.ru

Севастьянов Евгений Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры полупроводниковой электроники Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: sese@ngs.ru

Черников Евгений Викторович – ведущий технолог Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: evvch192184@gmail.com

Сергейченко Надежда Владимировна – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: edelveisu@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6947-8895

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Maksimova Nadezda K., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), senior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: nkmax3@yandex.ru; ORCID: 0000-0002-9365-0824.

Malinovskaya Tatyana D., Dr.Sc. (Chemistry), professor, Head of the Laboratory, Siberian Physical-Technical Institute, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: malintd@yandex.ru

Sevastyanov Evgenii Yu., Cand.Sc. (Engineering), associate professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sese@ngs.ru

Chernikov Evgenii V., leading technologist, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: evvch192184@gmail.com

Sergeychenko Nadezhda V., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: edelveisu@yandex.ru; ORCID: 0000-0001-6947-8895.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023

Научная статья
УДК 535.8
doi: 10.17223/7783494/1/10

Подходы к бесконтактной диагностике стрессовых состояний с использованием инфракрасной и терагерцовой спектроскопии

Юрий Владимирович Кистенев¹, Игорь Тримасов²,
Александр Павлович Шкуринов³

^{1,2} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

³ *Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, Москва, Россия*

¹ *yuk@iao.ru; ORCID: 0000-0001-5760-1462*

² *ORCID: 0000-0002-6156-2395*

³ *ashkurinov@physics.msu.ru; ORCID: 0000-0002-6309-4732*

Аннотация. Описаны методики оценки и определения стрессовых состояний. Рассмотрены существующие и перспективные инструментальные подходы бесконтактной диагностики стрессовых состояний. Описаны инструментальные методы пассивного терагерцового (ТГц) видения. Приведены примеры наиболее чувствительных инструментальных методов контроля летучих молекулярных биомаркеров в пробах выдыхаемого воздуха, такие как газовая хроматография с масс-спектрометрической детекцией, спектроскопия затухания излучения в кольцевом резонаторе, лазерная оптико-акустическая спектроскопия (ЛОАС), лидарный метод для дистанционного газоанализа в сочетании с инфракрасными (ИК) параметрическими генераторами света (ПГС), рассмотрены их преимущества и недостатки.

Ключевые слова: стресс, летучие молекулярные биомаркеры, выдыхаемый воздух, инфракрасная спектрометрия, терагерцовая спектрометрия

Благодарности: исследование выполнено при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030).

Для цитирования: Кистенев Ю.В., Тримасов И., Шкуринов А.П. Подходы к бесконтактной диагностике стрессовых состояний с использованием инфракрасной и терагерцовой спектроскопии // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 71–81. doi: 10.17223/7783494/1/10

Original article
doi: 10.17223/7783494/1/10

Approaches to non-contact diagnostics of stress conditions using infra-red and terahertz spectroscopy

Yury V. Kistenev¹, Igor Trimassov², Alexander P. Shkurinov³

^{1,2} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

³ *Institute on Laser and Information Technologies of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

¹ *yuk@iao.ru; ORCID ID: 0000-0001-5760-1462*

² *ORCID ID: 0000-0002-6156-2395*

³ *ashkurinov@physics.msu.ru ORCID ID: 0000-0002-6309-4732*

Abstract. The paper describes methods for assessing and determining stress conditions. The existing and promising instrumental approaches of contactless diagnostics of stress states are considered. Instrumental methods of passive terahertz (THz) vision are described. Examples of the most sensitive instrumental methods for monitoring volatile molecular biomarkers in exhaled air samples are given, such as gas chromatography with mass spectrometric detection, radiation attenuation spectroscopy in a ring resonator, laser optical-acoustic spectroscopy (LOAS), lidar method for remote gas analysis in combination with infra-red (IR) optical parametric oscillators (OPOs). Their advantages and disadvantages are considered.

Keywords: stress, volatile molecular biomarkers, exhaled air, infrared spectrometry, terahertz spectrometry

Acknowledgments: This study was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030).

For citation: Kistenev, Yu.V., Trimassov, I. & Shkurinov, A.P. (2023) Approaches to non-contact diagnostics of stress conditions using infra-red and terahertz spectroscopy. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 71–81. doi: 10.17223/7783494/1/10 (In Russian).

Введение

Стресс – это неспецифическая адаптивная реакция организма на внешнее воздействие (физическое или психологическое), нарушающая его гомеостаз, а также изменяющая состояние нервной системы или всего организма [1, 2]. Стрессы принято делить на физиологические и психологические. Последние, в свою очередь, подразделяются на информационные и эмоциональные. Длительный стресс может приводить к целому ряду осложнений – от метаболического синдрома до сердечно-сосудистых заболеваний, а также к фрустрациям и психическим расстройствам [3–7].

В 1990-х гг. был обнаружен эффект коллективной стрессорной реакции, проявляющийся в группах и популяциях [8, 9]. Этот эффект, названный групповым стрессом, состоял в том, что при значительном адаптационном напряжении для группы людей корреляции между их физиологическими параметрами увеличивались, а в ходе успешной адаптации – уменьшались. Таким образом, для компенсации стрессовых состояний необходимы методики оперативной детекции не только индивидуального, но и коллективного стресса. При разработке новых методов диагностики состояния для их валидации необходимо использовать стандартные методы решения той же диагностической задачи. Подходы, рутинно применяемые в клинической практике, могут использоваться как референсные.

В данном обзоре рассмотрены возможные референсные методики диагностики стресса, а также перспективные методы бесконтактного выявления стрессовых состояний с использованием ИК- и ТГц-спектроскопии.

1. Подходы к выявлению стрессовых состояний, применяемые в клинической практике

В клинической практике используют три класса методик диагностики стрессового состояния: физиологические, психофизиологические и психологические [10].

Физиологические методики выявления стрессовых состояний включают:

1. Оценку состояния центральной нервной системы путем анализа характерных паттернов на электроэнцефалограммах.

2. Оценку состояния вегетативной нервной системы путем регистрации:

- кожно-гальванической реакции [11];
- кожной температуры;
- показателей состояния дыхательной системы (частота и глубина дыхания);
- показателей состояния сердечно-сосудистой системы.

В настоящее время регистрация variability сердечного ритма считается наиболее информатив-

ным методом количественной оценки вегетативной регуляции сердечного ритма и функционального состояния организма. В этой области широко используется ряд параметров, являющихся производными классических статистических показателей (в частности, индекс напряжения), которые были предложены Р.М. Баевским [12]. Преимуществами кардиоинтервалометрии являются надежность (устойчивость к шумовой помехе), наличие четкой зависимости между системами организма и параметрами кардиоинтервалограммы, неинвазивность, объективность получаемых результатов, а также интегральность показателей, дающая возможность объективной оценки вегетативного гомеостаза [13]. С участием авторов была реализована методика биоуправления на основе мониторинга индекса напряжения, которая позволила производить оценку и коррекцию функционального состояния младших школьников [14].

3. Исследование биохимических показателей стресса:

– содержание катехоламинов, калия и натрия в слюне, что дополнительно отражает тип вегетативной нервной системы [15];

– биохимические показатели крови, которые, например, могут меняться при активизации коры надпочечников [16].

1.1. Психофизиологические методы выявления стрессовых состояний

Оценка характеристик нервной системы чаще всего осуществляется с помощью следующих психофизиологических методик [17]:

– определение скорости сложной зрительно-моторной реакции;

– теппинг-тест;

– определение критической частоты слияния мельканий или звуковых щелчков;

– двигательные методики.

Эффективность психических процессов в исследовании стресса и адаптации к стрессовым состояниям чаще всего оценивается с помощью следующих методик:

– определение латентного периода восприятия времени;

– исследование устойчивости, объема, распределения и переключения внимания;

– исследование кратковременной зрительной памяти.

1.2. Психологические методики оценки стрессовых состояний и личностных характеристик

В этой области используют опросники личности, предназначенные для получения данных со слов ис-

пытуемых. Среди опросников наиболее популярен тест тревожности Спилбергера–Ханина [18]. Разработаны методики, основанные на шкалировании состояния, включая симптоматический опросник SCL-90-R (Symptom Checklist-90-Revised, «Шкала психологического стресса PSM-25», «Шкала воспринимаемого стресса-10» [10, 19]. Часто используются «цветовой тест» М. Люшера и его модификации.

В целом можно отметить, что психологические методики просты в использовании, не требуют сложного оборудования, но малоприспособлены для мониторинга стрессовых состояний в реальном режиме времени. Противоположная ситуация характерна для физиологических методик.

2. Инструментальные подходы к бесконтактной диагностике стрессовых состояний

Доведен до уровня экспериментальных образцов ряд инструментальных подходов для дистанционной регистрации пульсовой и дыхательной волн, температуры на поверхности тела. К ним относятся применение алгоритмов компьютерного зрения для анализа видеоизображений [19, 20], использование СВЧ-радаров [21]. При соответствующей обработке данных пульса и дыхания подобные методы потенциально позволят оценивать стрессовые состояния.

Контроль паттернов дыхания может также проводиться на основе пассивной регистрации периодически меняющегося теплового сигнала с поверхности лица [22] или регистрации периодических изменений содержания CO₂ [23] в районе ноздрей.

Авторами предложен новый метод бесконтактной диагностики психоэмоционального состояния человека, основанный на регистрации ИК- и ТГц-изображений лица человека (далее – ИК-ТГц-изображения) [24, 25]. Данный метод позволяет учесть различные факторы, вызывающие локальные изменения температуры поверхности лица, включая дыхательные циклы, вариации кровотока при изменении тонуса кровеносных сосудов и мышц лица [26]. Разработанный алгоритм обработки изображений позволяет выделить из полного сигнала, воспринимаемого системой регистрации, информативный вклад ТГц-канала. Одновременная регистрация ИК-ТГц-изображений лица испытуемого и его психофизиологических показателей проводилась в ситуациях физического стресса (кратковременные интенсивные физические упражнения – функциональная проба «приседания»), электростимуляции и информационного стресса (когнитивная нагрузка – простые арифметические вычисления «в уме»). Полученные данные сравнивались с данными аналогичных измерений в спокойном состоянии. Показано с использованием кластерного анализа ИК-ТГц-изображений, что

возможно разделение испытуемых по типу реакций кровеносной системы в стрессовых состояниях.

Подход, основанный на регистрации летучих молекулярных биомаркеров (ЛМБ) в выдыхаемом воздухе, является очень привлекательным, поскольку технически несложно провести регистрацию выдоха как у отдельных испытуемых, так и группы людей, находящихся в помещении. Данный подход активно развивается для диагностики различных заболеваний [27–29], однако на текущий момент в литературе представлено небольшое число работ по его использованию для мониторинга стрессовых состояний. В основе данного подхода лежат взаимосвязи между профилем метаболитов в биотканях, биологических жидкостях и выдыхаемом воздухе. В работе [30] представлен справочник по летучим органическим веществам, содержащимся в слюне (359 молекул), крови (154 молекулы), кожных выделениях (532 молекулы), выдыхаемом воздухе (872 молекулы), моче (279 молекул), фекалиях (381 молекула). Показано, что ряд молекул (ацетальдегид, 2-пропанон (ацетон), бензальдегид, 1-бутанол, 2-бутанон, гексанал, гептанал, октанал, пентанол, бензол, стирол, толуол) присутствует во всех субстанциях.

В работе [31] представлены результаты исследования состава воздуха в кинотеатре в процессе демонстрации различных эмоциональных событий на экране. Эти события сопровождались выбросом специфических химических веществ, в частности, обнаружена корреляция содержания CO₂, изопрена, ацетона, метанола, ацетальдегида, 2-фуранона и бутадиена в кинозале, и демонстрацией эмоциональных сцен.

Проведено исследование молекулярных профилей дыхания при стрессе, индуцированном темповыми арифметическими вычислениями [32]. Пробы выдыхаемого воздуха были собраны у 22 участников (10 мужчин и 12 женщин) после двух эмоциональных воздействий: восприятие спокойной классической музыки и указанных выше арифметических вычислений. В качестве референтного метода использовалась регистрация сердечно-сосудистых реакций. Анализ проб выдыхаемого воздуха проводился методом термодесорбционной газовой хроматографии–масс-спектрометрии. Было выявлено 6 специфических для стрессового состояния ЛМБ: индол, 2-гидрокси-1-фенилэтанон, бензальдегид, 2-этилгексан-1-ол, 2-метилпентадекан и неидентифицированная компонента, которые позволили детектировать стресс с чувствительностью 83,3% и селективностью 91,6% для женщин и со 100% чувствительностью и 90% селективностью для мужчин.

В работе [33] представлены результаты анализа испарений с кожи при наличии стресса, вызванного

темповыми арифметическими вычислениями, аналогично [32]. Выявленные маркеры стресса: бензойная кислота, п-декановая кислота, изомер ксилола и 3-карен.

Среди выявленных в экспериментах ЛМБ, ассоциированных со стрессом, также представлены NO, изопрен, терпен, п-пропанол [34].

2.1. Инструментальные методы детектирования температурных 2D-профилей лица

Основными требованиями к таким системам являются чувствительность, малый уровень собственных шумов, работа при комнатных температурах, в крайнем случае – замкнутый контур охлаждения. Пространственное разрешение не является существенным фактором, поскольку размер отдельных текстур 2D-температурных профилей лица составляет несколько мм. Для пассивной регистрации

2D-изображений в ТГц-диапазоне широко используются матричные приемники на основе микроболометров [35]. Например, матрица 320×240 микроболометров V-T0831C (NEC, Япония) работает в диапазоне 1–30 ТГц, обладает пределом детектирования на уровне 100 пВт на частоте 1 ТГц и 30–50 пВт на частотах от 4 ТГц [36]. Суб-ТГц-камера, разработанная компанией Terasense Group, Inc. (США), состоит из массива (32 × 32) пиксельных детекторов, работающих при комнатной температуре, имеет мощность шума $1 \text{ нВт}/(\text{Гц})^{1/2}$ в диапазоне 0,01–1 ТГц, чувствительность 50 кВ/Вт, дифференцирует различие в 20% мощности падающего на соседние детекторы излучения, способна регистрировать до 50 кадров в секунду [37]. Пример регистрации температуры лица для разных фаз дыхательного цикла с использованием матрицы микроболометров V-T0831C представлен на рис. 1.

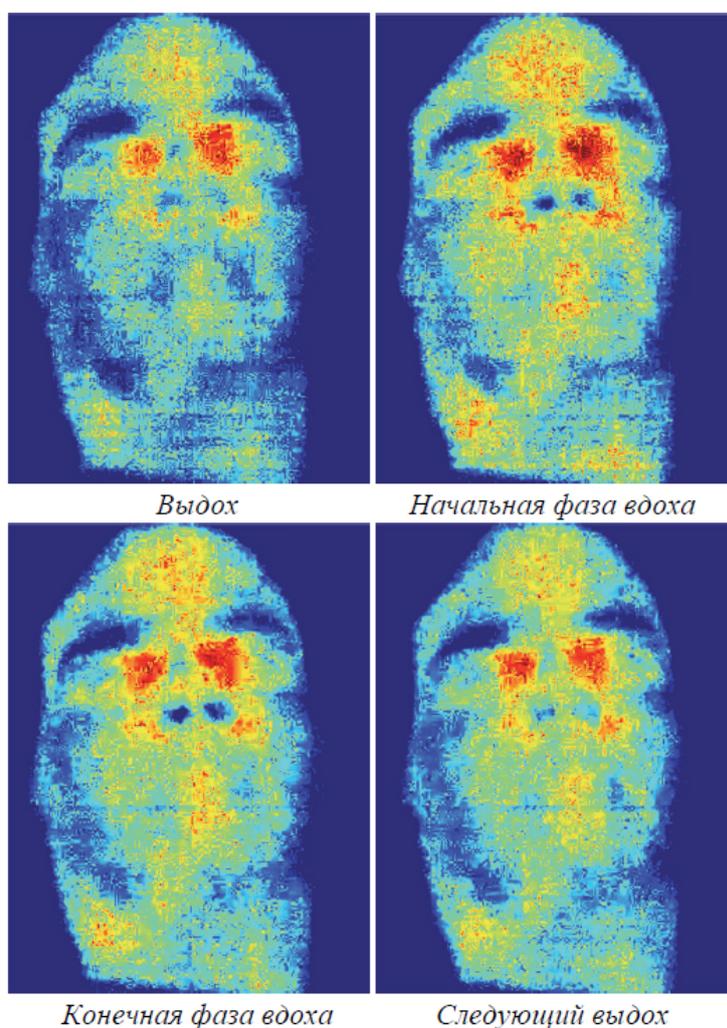


Рис. 1. Пример регистрации температуры лица для разных фаз дыхательного цикла с использованием матрицы микроболометров V-T0831C [25]

Fig. 1. An example of a face temperature registration for different phases of the respiratory cycle using a microbolometer matrix V-T0831C [25]

Структуры на сверхрешетках с квантовыми точками обеспечивают максимальную чувствительность среди фотоэлектронных приборов и свободны от принципиального недостатка квантовых ям, которые не восприимчивы к нормально падающим фотонам [38, 39].

В целом температура 50–60 К является критической с точки зрения чувствительности тепловых и фотонных детекторов в дальнем ИК-диапазоне: выше нее, особенно при комнатной температуре, тепловые приемники имеют существенные преимущества и наоборот [40].

2.2. Инструментальные методы контроля профиля летучих молекулярных маркеров в пробах выдыхаемого воздуха

Газовая хроматография с масс-спектрометрической детекцией (ГХ-МС) является золотым стандартом для анализа следовых количеств веществ, особенно органических в газовых смесях биологического происхождения. Метод имеет чувствительность на уровне 0,1 ppt [41]. Существуют приборные модификации ГХ-МС, например, масс-спектрометрия на основе выделения потоков ионов (Selected Ion Flow Tube Mass Spectrometry – SIFT-MS), спектрометрия подвижности ионов (Ion Mobility Spectrometry – IMS), масс-спектрометрия на основе реакции переноса протонов (Proton-transfer-reaction mass spectrometry – PTR-MS) [42–44]. Данный класс методов очень полезен на этапе выявления отдельных ЛМБ, но сложен в рутинных измерениях, не все варианты технической реализации позволяют проводить оперативный контроль проб выдыхаемого воздуха.

Электрохимические сенсоры основаны на изменении электрических свойств электродов за счет химических реакций в контакте с анализируемым газом. Высокий практический потенциал имеют устройства, состоящие из набора сенсоров, каждый из которых реагирует на отдельное вещество или группу веществ (технология «электронный нос»). Примером является устройство Suganose 320, состоящее из 32 полимерных хемистезисторов, по-разному реагирующих на наборы ЛМБ [45–49]. Недостатками химических сенсоров являются низкая селективность анализа, особенно для сложных газовых смесей, короткий срок службы.

Анализ характеристик спектрометров, используемых для анализа выдыхаемого воздуха, представлен в [50]. Наиболее чувствительными методами локального газоанализа являются метод спектроскопии затухания излучения в кольцевом резонаторе (Cavity ring down spectroscopy – CRDS) и лазерная оптико-акустическая спектроскопия (ЛОАС). Чув-

ствительность CRDS может достигать $\sim 10^{-10}$ см⁻¹ при использовании зеркал в измерительной ячейке с коэффициентом отражения $R \geq 0,9999$. Существенным ограничением метода является техническая сложность перестройки длины волны в принципе, что связано с тем, что высокий коэффициент отражения достигается только в узком спектральном интервале [51].

ЛОАС обеспечивает порог обнаружения на уровне pptv [52]. Поскольку оптико-акустический сигнал пропорционален поглощенной газовой пробой энергии лазерного излучения, при реализации данного метода желательно использовать мощные источники лазерного излучения. Наряду с лазерами при реализации метода ЛОАС в ИК-диапазоне используются параметрические генераторы света (ПГС), которые также обеспечивают плавную перестройку в широком диапазоне [53]. В соответствии с литературными данными, наиболее часто используемые ПГС обеспечивают мощность от нескольких сотен мВт до единиц Вт и область перестройки 2–4 мкм [54–56]. Принцип лазерного оптико-акустического детектирования использован компанией ООО «Специальные технологии» (г. Новосибирск) при разработке газоанализатора LaserBreeze, который включает в себя источник излучения на основе ПГС с перестройкой длины волны от 2,5 до 10,7 мкм с накачкой Nd:YLF лазером на длине волны 1,053 мкм, разработанный с участием авторов [55–59]. Столь широкая перестройка длины волны достигнута путём использования в источнике лазерного излучения двух нелинейных кристаллов. При этом генерация излучения в диапазоне от 2,5 до 4,5 мкм обеспечивается за счёт использования периодически поляризованной структуры ниобата лития, легированного оксидом магния MgO:PPLN. В спектральном диапазоне 4,3–10,7 мкм генерация реализуется за счёт использования в резонаторе ПГС халькогенидного монокристалла тиагаллата ртути HgGa₂S₄ (HGS). Недостатком ПГС является достаточно большая спектральная ширина линии генерации. Пример регистрации спектра поглощения искусственной газовой смеси газоанализатором LaserBreeze представлен на рис. 2.

Реализация лидарного метода для дистанционного газоанализа с использованием ПГС может обеспечить контроль коллективного стресса посредством регистрации ЛМБ в помещении. Реализация лидара с использованием ПГС на основе кристалла КТА с диапазоном перестройки 3–4 мкм представлена в работах [55, 59, 60]. Дистанционный компонентный анализ газовых проб с использованием лидаров может проводиться на основе метода дифференциального поглощения (differential absorption lidar, DIAL) [61, 62].

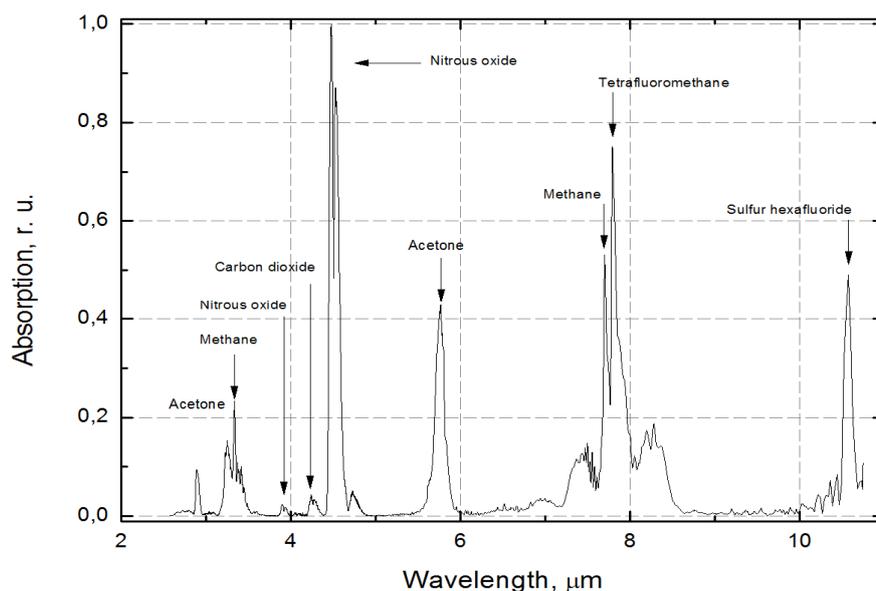


Рис. 2. Пример регистрации спектра поглощения искусственной газовой смеси газоанализатором LaserBreeze

Fig. 2. An example of registration of an artificial gas mixture absorption spectrum by the LaserBreeze gas analyzer

Данный метод в последние годы существенно видоизменился: для идентификации и определения концентраций молекулярных компонент используется измерение поглощения атмосферы на большом количестве длин волн (до нескольких сотен) [63]. Подобная методика потенциально позволяет идентифицировать одновременно уже десятки газов [64]. Данный метод получил название метода дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (differential optical absorption spectroscopy, DOAS) [63]. Отметим, что недостатком метода является отсутствие критериев о том, какие и сколько компонент необходимо учитывать при минимизации целевой функции.

Заключение

Для бесконтактного выявления стрессовых состояний перспективно использование температурных паттернов лица испытуемого, а также летучих молекул-биомаркеров стресса в выдыхаемом возду-

хе. Для повышения точности диагностики возможна комбинация обоих подходов. Реализация первого подхода может быть основана на регистрации ИК-ТГц-изображений лица человека. При создании подобных систем, работающих при комнатной температуре, оптимально использовать тепловые матричные приемники. Реализация второго подхода может быть основана на использовании набора химических датчиков или методов лазерной абсорбционной спектроскопии. Следует отметить, что лишь лидарный вариант молекулярной спектроскопии позволяет контролировать коллективный стресс.

При выборе референсного клинического метода целесообразно ориентироваться на инструментальные количественные методы, такие как кардиоинтервалометрия, регистрацию биохимических показателей стресса в биологических жидкостях, психофизиологических реакций организма на внешние воздействия.

Список источников

1. Nitsch J.R. Zur Gegenstandsbestimmung der Stressforschung // Stress: Theorien, Untersuchungen, Maßnahmen. 1981. P. 29–51.
2. Russell E., Koren G., Rieder M., Uum S. Hair cortisol as a biological marker of chronic stress: current status, future directions and unanswered questions // Psychoneuroendocrinology. 2012. V. 37(5). P. 589–601. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2011.09.009
3. Stewart W.F., Ricci J.A., Chee E., Hahn S.R., Morganstein D. Cost of lost productive work time among US workers with depression // JAMA. 2003. V. 289(23). P. 3135–3144. DOI: 10.1001/jama.289.23.3135
4. Pardon M.C., Marsden C.A. The long-term impact of stress on brain function: from adaptation to mental diseases // Neuroscience and biobehavioral reviews. 2008. V. 32. P. 1071–1072. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2008.05.013
5. Bergmann N., Gyntelberg F., Faber J. The appraisal of chronic stress and the development of the metabolic syndrome: a systematic review of prospective cohort studies // Endocrine connections. 2014. V. 3(2) P. R55–R80. DOI: 10.1530/EC-14-0031
6. Machado A., Herrera A.J., de Pablos R.M., Espinosa-Oliva A.M., Sarmiento M., Ayala A., Cano J. Chronic stress as a risk factor for Alzheimer's disease // Reviews in the Neurosciences. 2014. V. 25(6). P. 785–804. DOI: 10.1515/revneuro-2014-0035
7. Golbidi S., Frisbee J.C., Laher I. Chronic stress impacts the cardiovascular system: animal models and clinical outcomes // American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology. 2015. V. 308(12). P. H1476–H1498. DOI: 10.1152/ajpheart.00859.2014

8. Горбань А.Н., Манчук В.Т., Петушкова Е.В. Динамика корреляции между физиологическими параметрами при адаптации и эколого-эволюционный принцип полифакторности // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 1987. Т. 10. С. 187–198.
9. Седов К.Р., Горбань А.Н., Петушкова Е.В., Манчук В.Т., Шаламова Е.Н. Корреляционная адаптометрия как метод диспансеризации населения // Вестник Академии медицинских наук СССР. 1988. № 10. С. 69–75.
10. Леонова А.Б. Психодиагностика функциональных состояний человека. М. : Изд-во Моск. ун-та, 1984. 200 с.
11. Аракелов Г.Г., Шотт Е.К. КГР как проявление эмоциональных, ориентировочных и двигательных составляющих стресса // Психологический журнал. 1998. Т. 19, № 4. С. 70–79.
12. Баевский Р.М. Прогнозирование состояний на грани нормы и патологии. М. : Книга по Требованию, 2014. 295 с.
13. Панченко Л.Л. Диагностика стресса: учеб.-метод. пособие. Владивосток : МГУ им. адм. Г.И. Невельского. 2005.
14. Кистенёва Р.А., Кистенёв Ю.В., Пеккер Я.С., Бразовский К.С., Бразовская Н.Г., Фокин В.А. Коррекция психоэмоционального напряжения у детей младшего школьного возраста с особыми образовательными потребностями с использованием адаптивного биоуправления // Бюллетень сибирской медицины. 2010. Т. 9, № 2. С. 113–118.
15. Смелищева Л.Н., Захаров Е.В. Содержание катехоламинов и ренина в слюне у лиц с различным исходным вегетативным тонусом // Вестник Курганского государственного университета. 2015. № 2(36). С. 13–16.
16. Сотникова Е.Д. Изменения в системе крови при стрессе // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агронотомия и животноводство. 2009. № 1. С. 50–55.
17. Горелов А.А., Румба О.Г., Гризорович Л.А., Весёлкина Т.Е. Психомоторные методы психодиагностики в научных исследованиях в сфере физической культуры и спорта // Новое в психолого-педагогических исследованиях. 2021. № 2. С. 26–37.
18. Спилбергер Ч.Д. Концептуальные и методологические проблемы исследования тревоги // Тревога и тревожность: хрестоматия / сост. и общ. ред. В.М. Астапова. 1983. С. 85–99.
19. Абабков В.А., Барышникова К., Воронцова-Венгер О.В., Горбунов И.А. Валидизация русскоязычной версии опросника «Шкала воспринимаемого стресса-10» // Вестник Санкт-Петербургского университета. Психология. 2016. № 2. С. 6–15.
20. Fadel A., Hongzi M., Zachary K., Dina K., Miller Robert C. Smart homes that monitor breathing and heart rate // Proceedings of the 33rd annual ACM conference on human factors in computing systems. 2015. P. 837–846. DOI: 10.1145/2702123.2702200
21. Горбатов К. Silicon Radar: О дистанционном измерении дыхания и пульса // СВЧ-электроника. 2017. № 3.
22. Lindemann J., Leiacker R., Rettinger G., Keck T. Nasal mucosal temperature during respiration // Clinical Otolaryngology & Allied Sciences. 2002. V. 27(3). P. 135–139. DOI: 10.1046/j.1365-2273.2002.00544.x
23. Fei J., Zhu Z., Pavlidis I. Imaging respiratory rate in the CO₂ absorption band // Proceedings of the 27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (Shanghai, China). 2005. P. 700–590. DOI: 10.1109/IEMBS.2005.1616510
24. Берловская Е.Е., Черкасова О.П., Ожередов И.А., Адамович Т.В., Исайчев Е.С., Исайчев С.А., Шкуринов А.П. Новый подход к терагерцевой диагностике психоэмоционального состояния человека // Квантовая электроника. 2019. Т. 49, № 1. С. 70–77.
25. Берловская Е.Е., Черкасова О.П., Ожередов И.А., Адамович Т.В., Исайчев Е.С., Исайчев С.А., Шкуринов А.П. Бесконтактная регистрация функции дыхания на основе анализа ИК-ТГц-изображений лица человека // Компьютерная оптика. 2020. Т. 44, № 6. С. 959–967. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-737
26. Herborn K.A., Graves J.L., Jerem P., Evans N.P., Nager R., McCafferty D.J., McKeegan D. Skin temperature reveals the intensity of acute stress // *Physiol Behav.* 2015. V. 152. P. 225–230.
27. Kistenev Y.V., Borisov A.V., Kuzmin D.A., Syrkina A.G. Analysis of exhaled air of patients with myocardial infarction by laser spectroscopy and data mining // *Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care VI. SPIE*, 2018. V. 10685. P. 142–148. DOI: 10.1117/12.2307058
28. Bukreeva E.B., Bulanova A.A., Kistenev Y.V., Nikiforova O.Y. Photoacoustic spectroscopy evaluation of the impact of smoking on the composition of exhaled air in patients with bronchopulmonary diseases // *Terapevticheskiy arkhiv.* 2017. V. 89(3) P. 34–37. DOI: 10.17116/terarkh201789334-37
29. Kistenev Y.V., Borisov A.V., Kuzmin D.A., Penkova O.V., Kostyukova N., Karapuzikov A.A. Exhaled air analysis using wideband wave number tuning range infrared laser photoacoustic spectroscopy // *Journal of Biomedical Optics.* 2017. V. 22(1). DOI: 10.1117/1.JBO.22.1.017002
30. de Lacy Costello B., Amann A., Al-Kateb H., Flynn C., Filipiak W., Khalid T., Ratcliffe N.M. A review of the volatiles from the healthy human body // *Journal of breath research.* 2014. V. 8(1). DOI: 10.1088/1752-7155/8/1/014001
31. Williams J., Stöner C., Wicker J., Krauter N., Derstroff B., Bourtsoukidis E., Kramer S. Cinema audiences reproducibly vary the chemical composition of air during films, by broadcasting scene specific emissions on breath // *Scientific reports.* 2016. V. 6(1). P. 1–10. DOI: 10.1038/srep25464
32. Turner M.A., Bandelow S., Edwards L., Patel P., Martin H.J., Wilson I.D., Thomas C.L.P. The effect of a paced auditory serial addition test (PASAT) intervention on the profile of volatile organic compounds in human breath: a pilot study // *Journal of Breath Research.* 2013. V. 7(1). DOI: 10.1088/1752-7155/7/1/017102
33. Martin H.J., Turner M.A., Bandelow S., Edwards L., Riazanskaia S., Thomas C.L.P. Volatile organic compound markers of psychological stress in skin: a pilot study // *Journal of Breath Research.* 2016. V. 10(4). DOI: 10.1088/1752-7155/10/4/046012
34. Tonacci A., Sansone F., Pala A.P., Conte R. Exhaled breath analysis in evaluation of psychological stress: A short literature review // *International Journal of Psychology.* 2019. V. 54(5). P. 589–597. DOI: 10.1002/ijop.12494
35. NEC. 2014. URL: <https://www.nec.com/en/press/201411/images/1101-01-01.pdf>
36. Muravev V.M., Gusikhin P.A., Andreev I.V., Kukushkin I.V. Novel relativistic plasma excitations in a gated two-dimensional electron system // *Physical review letters.* 2015. V. 114(10). DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.106805
37. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур // *Физика и техника полупроводников.* 1998. Т. 32, № 1. С. 3–18.
38. Вакс В.Л., Домрачева Е.Г., Ластовкин А.А., Приползин С.И., Собакинская Е.А., Черняева М.Б., Анфертьев В.А. Приемники излучения терагерцевого частотного диапазона // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.* 2013. № 6-1. С. 81–87.

39. Коротаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В.М., Солдатов Ю.И. Основы тепловидения. СПб. : НИУ ИТМО, 2012. Т. 122.
40. Obersteiner F., Bönisch H., Engel A. An automated gas chromatography time-of-flight mass spectrometry instrument for the quantitative analysis of halocarbons in air // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2016. V. 9 (1). P. 179–194.
41. GAS Dortmund. URL: <https://www.gas-dortmund.de/>
42. Amann A., Schwarz K., Wimmer G., Witkovsky V. Model based determination of detection limits for proton transfer reaction mass spectrometer // *Measurement Science Review*. 2010. V. 10(6). P. 180–188.
43. PTRS Group. URL: : <http://www.ptrs.com/>
44. Fernandes M.P., Venkatesh S., Sudarshan B.G. Early detection of lung cancer using nano-nose-a review // *The open biomedical engineering journal*. 2015. V. 9. P. 228. DOI: 10.2174/1874120701509010228
45. Wilson A.D., Baietto M. Advances in electronic-nose technologies developed for biomedical applications // *Sensors*. 2011. V. 11(1). P. 1105–1176. DOI: 10.3390/s110101105
46. Bruins M., Rahim Z., Bos A., van de Sande W.W., Endtz H. P., van Belkum A. Diagnosis of active tuberculosis by e-nose analysis of exhaled air // *Tuberculosis*. 2013. V. 93(2). P. 232–238. DOI: 10.1016/j.tube.2012.10.002
47. Schnabel R.M., Boumans M.L.L., Smolinska A., Stobberingh E.E., Kaufmann R., Roekaerts P.M.H.J., Bergmans D.C.J.J. Electronic nose analysis of exhaled breath to diagnose ventilator-associated pneumonia // *Respiratory medicine*. 2015. V. 109(11). P. 1454–1459. DOI: 10.1016/j.rmed.2015.09.014
48. Montuschi P., Mores N., Trové A., Mondino C., Barnes P.J. The electronic nose in respiratory medicine // *Respiration*. 2013. V. 85(1). P. 72–84. DOI: 10.1159/000340044
49. Степанов Е.В. Методы высокочувствительного газового анализа молекул-биомаркеров в исследованиях выдыхаемого воздуха // Труды Института общей физики им. А.М. Прохорова. 2005. Т. 61. С. 5–47.
50. Chow K.K., Short M., Zeng H. A comparison of spectroscopic techniques for human breath analysis // *Biomedical Spectroscopy and Imaging*. 2012. V. 1(4). P. 339–353. DOI: 10.3233/BSI-120029
51. De Gouw J. A., Te Lintel Hekkert S., Mellqvist J., Warneke C., Atlas E.L., Fehsenfeld F.C., Zhu X. Airborne measurements of ethene from industrial sources using laser photo-acoustic spectroscopy // *Environmental science & technology*. 2009. V. 43(7). P. 2437–2442. DOI: 10.1021/es802701a
52. Li J., Chen W., Yu B. Recent progress on infrared photoacoustic spectroscopy techniques // *Applied Spectroscopy Reviews*. 2011. V. 46(6). P. 440–471. DOI: 10.1080/05704928.2011.570835
53. Bozóki Z., Pogány A., Szabó G. Photoacoustic instruments for practical applications: present, potentials, and future challenges // *Applied Spectroscopy Reviews*. 2011. V. 46(1). P. 1–37. DOI: 10.1080/05704928.2010.520178
54. Kolker D.B., Pustovalova R.V., Starikova M.K., Karapuzikov A.I., Karapuzikov A.A., Kuznetsov O.M., Kistenev Y.V. Optical parametric oscillator within 2.4–4.3 μm pumped with a nanosecond Nd: YAG Laser // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2012. V. 25(1). P. 77–81. DOI: 10.1134/S1024856012010071
55. Romanovskii O.A., Sadovnikov S.A., Kharchenko O.V., Shumskii V.K., Yakovlev S.V. Optical parametric oscillators in lidar sounding of trace atmospheric gases in the 3–4 μm spectral range // *Optical Memory and Neural Networks*. 2016. V. 25(2). P. 88–94. DOI: 10.1117/12.2228564
56. Karapuzikov A.A., Sherstov I.V., Kolker D.B., Karapuzikov A.I., Kistenev Y.V., Kuzmin D.A., Lokonov V.N. LaserBreeze gas analyzer for noninvasive diagnostics of air exhaled by patients // *Physics of wave phenomena*. 2014. V. 22(3). P. 189–196. DOI: 10.3103/S1541308X14030054
57. Kostyukova N.Y., Boyko A.A., Zenov K.G., Starikova M.K., Kolker D.B., Karapuzikov A.A., Kuzmin D.A. Twin HgGa2S4 optical parametric oscillator at 4.3–10.78 μm for biomedical applications // *Saratov Fall Meeting 2014: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XVI; Laser Physics and Photonics XVI; and Computational Biophysics*. SPIE, 2015. V. 9448. P. 30–35. DOI: 10.1117/12.2181802
58. Карапузи́ков А.А., Кузнецов О.М., Кистенев Ю.В. Наносекундный параметрический генератор света в среднем ИК-диапазоне с двухпроходной накачкой // *Приборы и техника эксперимента*. 2012. № 2. С. 124–128.
59. Романовский О.А., Садовников С., Харченко О.В., Яковлев С.В. Возможности применения параметрического генератора света в задачах лазерного зондирования атмосферы в ИК-диапазоне // *Актуальные проблемы радиофизики : VII Международная научно-практическая конференция, г. Томск, 18–22 сентября 2017 г.* STT Publishing, 2017. С. 162.
60. Бочковский Д.А., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. Лидарное зондирование малых газовых составляющих атмосферы методом дифференциального поглощения: результаты моделирования и экспериментов // *Известия Томского политехнического университета. Математика и механика. Физика*. 2014. Т. 325, № 2. С. 127–136.
61. Weitkamp C. (ed.). *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. Springer Science & Business, 2006. V. 102.
62. Ионин А.А., Козлов А.Ю., Котков А.А., Романовский О.А., Харченко О.В., Яковлев С.В., Климачев Ю.М. Дистанционное зондирование закиси азота и метана с использованием линий излучения обертонового СО-лазера // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2014. Т. 81, № 2. С. 313–316.
63. Platt U., Stutz J. *Differential absorption spectroscopy // Differential optical absorption spectroscopy*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2008. P. 135–174. DOI: 10.1007/978-3-540-75776-4
64. Гейко П.П., Петров Д.В., Смирнов С.С. Реализация метода дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии для измерения вулканических газовых выбросов // *Научное приборостроение*. 2018. Т. 28, № 4. С. 103–109.

References

1. Nitsch, J.R. (1981) Zur Gegenstandsbestimmung der Stressforschung. *Stress: Theorien, Untersuchungen, Maßnahmen*. pp. 29–51.
2. Russell, E., Koren, G., Rieder, M. & Uum, S. (2012) Hair cortisol as a biological marker of chronic stress: current status, future directions and unanswered questions. *Psychoneuroendocrinology*. 37(5). pp. 589–601. DOI: 10.1016/j.psyneuen.2011.09.009
3. Stewart, W.F., Ricci, J.A., Chee, E., Hahn, S.R. & Morganstein, D. (2003) Cost of lost productive work time among US workers with depression. *Jama*. 289(23). pp. 3135–3144. DOI: 10.1001/jama.289.23.3135

4. Pardon, M.C. & Marsden, C.A. (2008) The long-term impact of stress on brain function: from adaptation to mental diseases. *Neuroscience and biobehavioral reviews*. 32. pp. 1071–1072. DOI: 10.1016/j.neubiorev.2008.05.013
5. Bergmann, N., Gyntelberg, F. & Faber, J. (2014) The appraisal of chronic stress and the development of the metabolic syndrome: a systematic review of prospective cohort studies. *Endocrine connections*. 3(2) pp. R55–R80. DOI: 10.1530/EC-14-0031
6. Machado, A., Herrera, A.J., de Pablos, R.M., Espinosa-Oliva, A.M., Sarmiento, M., Ayala, A. & Cano, J. (2014) Chronic stress as a risk factor for Alzheimer's disease. *Reviews in the Neurosciences*. 25(6). pp. 785–804. DOI: 10.1515/revneuro-2014-0035
7. Golbidi, S., Frisbee, J.C. & Laher, I. (2015) Chronic stress impacts the cardiovascular system: animal models and clinical outcomes. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*. 308(12). pp. H1476–H1498. DOI: 10.1152/ajpheart.00859.2014
8. Gorban, A.N., Manchuk, V.T. & Petushkova, E.V. (1987) Dinamika korrelyatsii mezhdu fiziologicheskimi parametrami pri adaptatsii i ekologo-evolucionniy princip polyfaktornosti [Dynamics of correlation between physiological parameters during adaptation and ecological-evolutionary principle of polyfactoricity]. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ecosystem - Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*. 10. pp. 187–198.
9. Sedov, K.R., Gorban, A.N., Petushkova, E.V., Manchuk, V.T. & Shalamova, E.N. (1988) Korrelyatsionnaya adaptometriya kak metod dispanserizatsii naseleniya [Correlation adaptometry as a method of medical examination of the population]. *Vestnik akademii nauk SSSR - Bulletin of the USSR Academy of Sciences*. (10). pp. 69–75.
10. Leonova, A.B. (1984) *Psichodiagnostika funktsional'nyh sostoyaniy cheloveka* [Psychodiagnostics of functional states of a person]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta.
11. Arakelov, G.G. & Schott, E.K. (1998) KGR kak proyavlenie emotsional'nyh, orientirovochnykh i dvigatel'nykh sostavlyayushikh stressa [KGR as a manifestation of emotional, orientation and motor components of stress]. *Psichologicheskii zhurnal – Psychological Journal*. 19(4). pp. 70–79.
12. Baevisky, R.M. (2014) *Prognozirovanie sostoyaniy na grani normy i patologii* [Prediction of conditions on the verge of norm and pathology]. Moscow: Kniga po Trebovaniyu.
13. Panchenko, L.L. (2005) *Diagnostika stressa: uchebno-metodicheskoe posobie* [Stress diagnostics: an educational and methodical manual]. Vladivostok: MGU im. Adm. G.I. Nevel'skogo.
14. Kisteneva, R.A., Kistenev, Yu.V., Pekker, Ya.S., Brazovsky, K.S., Brazovskaya, N.G. & Fokin, V.A. (2010). Correction of psycho-emotional stress in primary schoolchildren with special educational needs with the use of biofeedback. *Bulleten' sibirskoy mediciny – Bulletin of Siberian Medicine*. 9(2). pp. 113–118. (In Russian)
15. Smelysheva, L.N. & Zakharov, E.V. (2015) The content of catecholamines and rennin in saliva in persons with various initial autonomic tones. *Vestnik Kurganskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of Kurgan State University*. 2 (36). pp. 13–16. (In Russian).
16. Sotnikova, E.D. (2009) Changes in blood system at stress. *Vestnik Rossiiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Agronomiya i zhivotnovodstvo – Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Agronomy and Animal Husbandry*. (1). pp. 50–55. (In Russian).
17. Gorelov, A.A., Rumba, O.G., Grigorovich, L.A., Veselkina, T.E. (2021) Psychomotor methods of psychodiagnostics in scientific research in the field of physical culture and sports. *Novoe v psikhologo-pedagogicheskikh issledovaniyakh – Innovation in Psychological and Pedagogical Studies*. 2(62). pp. 26–37. (In Russian).
18. Spielberger, C.D. (1983) Kontseptualnye i metodologicheskie problemy issledovaniya trevogi [Conceptual and methodological problems of anxiety research]. In: Astapova, V.M. (Ed.) *Trevoga i trevozhnost: khrestomatiya* [Anxiety and disturbance: a textbook]. pp. 85–99.
19. Ababkov, V.A., Baryshnikova, K., Vorontsova-Wenger, O.V. & Gorbunov, I.A. (2016) Validation of the Russian version of the questionnaire “Scale of perceived stress-10”. *Vestnik of Saint Petersburg University. Psychology*. (2). pp. 6–15. (In Russian).
20. Fadel, A., Hongzi, M., Zachary, K., Dina, K., Miller, R.C. (2015) Smart homes that monitor breathing and heart rate. In: *Proceedings of the 33rd annual ACM conference on human factors in computing systems*. pp. 837–846. DOI: 10.1145/2702123.2702200
21. Gorbatov, K. (2017) Silicon Radar: O distantsionnom izmerenii dykhaniya i pulsa [Silicon Radar: About remote measurement of respiration and pulse]. *SVCh-elektronika – Microwave electronics*. 3.
22. Lindemann, J., Leiacker, R., Rettinger, G., & Keck, T. (2002) Nasal mucosal temperature during respiration. *Clinical Otolaryngology & Allied Sciences*. 27(3). pp. 135–139. DOI: 10.1046/j.1365-2273.2002.00544.x
23. Fei, J., Zhu, Z. & Pavlidis, I. (2005) Imaging respiratory rate in the CO2 absorption band. In: *Proceedings of the 27th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, (Shanghai, China)*. pp. 700–750. DOI: 10.1109/IEMBS.2005.1616510
24. Berlovskaya, E.E., Cherkasova, O.P., Ozheredov, I.A., Adamovich, T.V., Isaichev, E.S., Isaichev, S.A. & Shkurinov A.P. (2019) Novyi podkhod k teragertsevoi diagnostike psikhoemotsionalnogo sostoyaniya cheloveka [A new approach to terahertz diagnostics of a person's psychoemotional state]. *Kvantovaya elektronika – Quantum electronics*. 49(1). pp. 70–77.
25. Berlovskaya, E.E., Cherkasova, O.P., Ozheredov, I.A., Adamovich, T.V., Isaichev, E.S., Isaichev, S.A. & Shkurinov, A.P. (2020) Beskontaktnaya registratsiya funktsii dykhaniya na osnove analiza IK-TGts-izobrazhenii litsa cheloveka [Contactless registration of respiratory function based on the analysis of IR-THz images of a person's face]. *Kompyuternaya optika – Computer Optics Journal*. 44(6). pp. 959–967. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-737.
26. Herborn, K.A., Graves, J.L., Jerem, P., Evans, N.P., Nager, R., McCafferty, D.J. & McKeegan, D. (2015) Skin temperature reveals the intensity of acute stress. *Physiology & Behavior*. 152. pp. 225–230.
27. Kistenev, Y.V., Borisov, A.V., Kuzmin, D.A. & Syrkina, A.G. (2018) Analysis of exhaled air of patients with myocardial infarction by laser spectroscopy and data mining. *Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care VI*. 10685. pp. 142–148. DOI: 10.1117/12.2307058
28. Bukreeva, E.B., Bulanova, A.A., Kistenev, Y.V. & Nikiforova, O.Y. (2017) Photoacoustic spectroscopy evaluation of the impact of smoking on the composition of exhaled air in patients with bronchopulmonary diseases. *Terapevticheskiy arkhiv – Therapeutic Archive*. 89(3). pp. 34–37. DOI: 10.17116/terarkh201789334-37. (In Russian).
29. Kistenev, Y.V., Borisov, A.V., Kuzmin, D.A., Penkova, O.V., Kostyukova, N. & Karapuzikov, A.A. (2017) Exhaled air analysis using wideband wave number tuning range infrared laser photoacoustic spectroscopy. *Journal of Biomedical Optics*. 22(1). DOI: 10.1117/1.JBO.22.1.017002

30. de Lacy Costello, B., Amann, A., Al-Kateb, H., Flynn, C., Filipiak, W., Khalid, T. & Ratcliffe, N.M. (2014) A review of the volatiles from the healthy human body. *Journal of Breath Research*. 8(1). DOI: 10.1088/1752-7155/8/1/014001
31. Williams, J., Stönmner, C., Wicker, J., Krauter, N., Derstroff, B., Bourtsoukidis, E. & Kramer, S. (2016) Cinema audiences reproducibly vary the chemical composition of air during films, by broadcasting scene specific emissions on breath. *Scientific Reports*. 6(1). pp. 1–10. DOI: 10.1038/srep25464
32. Turner, M.A., Bandelow, S., Edwards, L., Patel, P., Martin, H.J., Wilson, I.D. & Thomas, C.L.P. (2013) The effect of a paced auditory serial addition test (PASAT) intervention on the profile of volatile organic compounds in human breath: a pilot study. *Journal of Breath Research*. 7(1). DOI: 10.1088/1752-7155/7/1/017102
33. Martin, H.J., Turner, M.A., Bandelow, S., Edwards, L., Riazanskaia, S. & Thomas, C.L.P. (2016) Volatile organic compound markers of psychological stress in skin: a pilot study. *Journal of Breath Research*. 10(4). DOI: 10.1088/1752-7155/10/4/046012
34. Tonacci, A., Sansone, F., Pala, A.P. & Conte, R. (2019) Exhaled breath analysis in evaluation of psychological stress: A short literature review. *International Journal of Psychology*. 54(5). pp. 589–597. DOI: 10.1002/ijop.12494
35. NEC (2014). Available from: <https://www.nec.com/en/press/201411/images/1101-01-01.pdf>
36. Muravev, V.M., Gusikhin, P.A., Andreev, I.V. & Kukushkin, I.V. (2015) Novel relativistic plasma excitations in a gated two-dimensional electron system. *Physical review letters*. 114(10). DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.106805
37. Alferov, Zh.I. (1998) Istoriya i budushchee poluprovodnikovykh geterostruktur [History and future of semiconductor heterostructures]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov – Physics and technology of semiconductors*. 32(1). pp. 3–18.
38. Vaks, V.L., Domracheva, E.G., Lastovkin, A.A., Pripolzin, S.I., Sobakinskaya, E.A., Chernyaeva, M.B. & Anfertiev, V.A. (2013) Receivers of THz frequency range. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo – Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 6-1. pp. 81–87. (In Russian).
39. Korotaev, V.V., Melnikov, G.S., Mikheev, S.V., Samkov, V.M. & Soldatov, Yu.I. (2012) *Osnovy teplovideniya* [Fundamentals of thermal imaging]. SPb: NIU ITMO. 122.
40. Obersteiner, F., Bönisch, H. & Engel, A. (2016) An automated gas chromatography time-of-flight mass spectrometry instrument for the quantitative analysis of halocarbons in air. *Atmospheric Measurement Techniques*. 9(1). pp. 179–194.
41. GAS Dortmund. Available from: <https://www.gas-dortmund.de/>
42. Amann, A., Schwarz, K., Wimmer, G. & Witkovsky, V. (2010) Model based determination of detection limits for proton transfer reaction mass spectrometer. *Measurement Science Review*. 10(6). pp. 180–188.
43. PTRS Group. Available from: <http://www.pters.com/>
44. Fernandes, M.P., Venkatesh, S. & Sudarshan, B.G. (2015) Early detection of lung cancer using nano-nose-a review. *The Open Biomedical Engineering Journal*. 9. pp. 228. DOI: 10.2174/1874120701509010228
45. Wilson, A.D. & Baietto, M. (2011) Advances in electronic-nose technologies developed for biomedical applications. *Sensors*. 11(1). pp. 1105–1176. DOI: 10.3390/s110101105
46. Bruins, M., Rahim, Z., Bos, A., van de Sande, W.W., Endtz, H.P. & van Belkum, A. (2013) Diagnosis of active tuberculosis by e-nose analysis of exhaled air. *Tuberculosis*. 93(2). pp. 232–238. DOI: 10.1016/j.tube.2012.10.002
47. Schnabel, R.M., Boumans, M.L.L., Smolinska, A., Stobberingh, E.E., Kaufmann, R., Roekaerts, P.M.H.J. & Bergmans, D.C.J.J. (2015) Electronic nose analysis of exhaled breath to diagnose ventilator-associated pneumonia. *Respiratory Medicine*. 109(11). pp. 1454–1459. DOI: 10.1016/j.rmed.2015.09.014
48. Montuschi, P., Mores, N., Trové, A., Mondino, C. & Barnes, P.J. (2013) The electronic nose in respiratory medicine. *Respiration*. 85(1). pp. 72–84. DOI: 10.1159/000340044
49. Stepanov, E.V. (2005) Metody vysokochuvstvitelnogo gazovogo analiza molekul-biomarkerov v issledovaniyakh vydykhaemogo vozdukh [Methods of highly sensitive gas analysis of biomarker molecules in exhaled air studies]. *Trudy instituta obshchei fiziki im. A.M. Prokhorova – Proceedings of the A.M. Prokhorov Institute of General Physics*. 61. pp. 5–47.
50. Chow, K.K., Short, M. & Zeng, H. (2012) A comparison of spectroscopic techniques for human breath analysis. *Biomedical Spectroscopy and Imaging*. 1(4). pp. 339–353. DOI: 10.3233/BSI-120029
51. De Gouw, J.A., Te Lintel Hekkert, S., Mellqvist, J., Warneke, C., Atlas, E.L., Fehsenfeld, F.C. & Zhu, X. (2009) Airborne measurements of ethene from industrial sources using laser photo-acoustic spectroscopy. *Environmental Science & Technology*. 43(7). pp. 2437–2442. DOI: 10.1021/es802701a
52. Li, J., Chen, W. & Yu, B. (2011) Recent progress on infrared photoacoustic spectroscopy techniques. *Applied Spectroscopy Reviews*. 46(6). pp. 440–471. DOI: 10.1080/05704928.2011.570835
53. Bozóki, Z., Pogány, A. & Szabó, G. (2011) Photoacoustic instruments for practical applications: present, potentials, and future challenges. *Applied Spectroscopy Reviews*. 46(1). pp. 1–37. DOI: 10.1080/05704928.2010.520178
54. Kolker, D.B., Pustovalova, R.V., Starikova, M.K., Karapuzikov, A.I., Karapuzikov, A.A., Kuznetsov, O.M. & Kistenev, Y.V. (2012) Optical parametric oscillator within 2.4–4.3 μm pumped with a nanosecond Nd: YAG Laser. *Atmospheric and Oceanic Optics*. 25(1). pp. 77–81. DOI: 10.1134/S1024856012010071
55. Romanovskii, O.A., Sadovnikov, S.A., Kharchenko, O.V., Shumskii, V.K. & Yakovlev, S.V. (2016) Optical parametric oscillators in lidar sounding of trace atmospheric gases in the 3–4 μm spectral range. *Optical Memory and Neural Networks*. 25(2). pp. 88–94. DOI: 10.1117/12.2228564
56. Karapuzikov, A.A., Sherstov, I.V., Kolker, D.B., Karapuzikov, A.I., Kistenev, Y.V., Kuzmin, D.A. & Lokonov, V.N. (2014) LaserBreeze gas analyzer for noninvasive diagnostics of air exhaled by patients. *Physics of Wave Phenomena*. 22(3). pp. 189–196. DOI: 10.3103/S1541308X14030054
57. Kostyukova, N.Y., Boyko, A.A., Zenov, K.G., Starikova, M.K., Kolker, D.B., Karapuzikov, A.A. & Kuzmin, D.A. (2015) Twin HgGa2S4 optical parametric oscillator at 4.3–10.78 μm for biomedical applications. In: *Saratov Fall Meeting 2014: Optical Technologies in Biophysics and Medicine XVI; Laser Physics and Photonics XVI; and Computational Biophysics*. 9448. pp. 30–35. DOI: 10.1117/12.2181802
58. Karapuzikov, A.A., Kuznetsov, O.M. & Kistenev, Yu.V. (2012) Nanosekundnyi parametricheskii generator sveta v srednem IK diapazone s dvukhprokhodnoi nakachkoi [Nanosecond parametric light generator in the mid-IR range with two-pass pumping]. *Pribory i tekhnika eksperimenta – Instruments and experimental techniques*. 2. pp. 124–128.

59. Romanovskii, O.A., Sadovnikov, S., Kharchenko, O.V. & Yakovlev, S.V. (2017) *Vozmozhnosti primeneniya parametricheskogo generatora sveta v zadachakh lazernogo zondirovaniya atmosfery v IK-diapazone* [The possibilities of using a parametric light generator in the tasks of laser sensing of the atmosphere in the IR range]. In: *Aktualnye problemy radiofiziki: VII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya (Tomsk, 18–22 sentyabrya 2017)* [Actual problems of radiophysics : VII International Scientific and Practical Conference, Tomsk, September 18–22, 2017]. STT Publishing.
60. Bochkovskii, D.A., Romanovskii, O.A., Kharchenko, O.V. & Yakovlev, S.V. (2014) *Lidarnoe zondirovanie mal'kh gazovykh sostavlyayushchikh atmosfery metodom differentsialnogo pogloshcheniya: rezultaty modelirovaniya i eksperimentov* [Lidar sounding of small gas components of the atmosphere by differential absorption method: results of modeling and experiments]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Matematika i mekhanika. Fizika - Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Mathematics and Mechanics. Physics.* 325(2). pp. 127–136.
61. Weitkamp, C. (Ed.). (2006) *Lidar: range-resolved optical remote sensing of the atmosphere*. Springer Science & Business. 102.
62. Ionin, A.A., Kozlov, A.Yu., Kotkov, A.A., Romanovskii, O.A., Kharchenko, O.V., Yakovlev, S.V., & Klimachev, Yu.M. (2014) Remote sensing of nitrous oxide and methane using radiation lines of a CO overtone laser. *Journal of Applied Spectroscopy.* 81(2). pp. 309–312.
63. Platt, U. & Stutz, J. (2008) Differential absorption spectroscopy. In: *Differential optical absorption spectroscopy*. Springer, Berlin, Heidelberg. pp. 135–174. DOI: 10.1007/978-3-540-75776-4
64. Geiko, P.P., Petrov, D.V. & Smirnov, S.S. (2018) Realizatsiya metoda differentsialnoi opticheskoi absorbtionnoi spektroskopii dlya izmereniya vulkanicheskikh gazovykh vybrosov [Implementation of the differential optical absorption spectroscopy method for measuring volcanic gas emissions]. *Nauchnoe priboroostroenie - Scientific instrumentation.* 28(4). pp. 103–109.

Информация об авторах:

Кистенев Юрий Владимирович – доктор физико-математических наук, заместитель проректора по научной и инновационной деятельности, заведующий лабораторией лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения, профессор кафедры общей и экспериментальной физики Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: yuk@iao.ru; ORCID: 0000-0001-5760-1462.

Тримасов Игорь – студент 1-го курса магистратуры, лаборант лаборатории лазерного молекулярного имиджинга и машинного обучения Национального исследовательского Томского государственного университета, (Томск, Россия). ORCID: 0000-0002-6156-2395.

Шкуринов Александр Павлович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор кафедры общей физики и волновых процессов Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (Москва, Россия). E-mail: ashkurinov@physics.msu.ru; ORCID: 0000-0002-6309-4732.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Kistenev Yuri V., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Deputy Vice-Rector for Research and Innovation, head of laboratory, professor, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: yuk@iao.ru. ORCID ID: 0000-0001-5760-1462.

Trimassov I., 1st year master's student, laboratory assistant, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). ORCID: 0000-0002-6156-2395.

Shkurinov Alexander P., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, professor, Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation). E-mail: ashkurinov@physics.msu.ru; ORCID ID: 0000-0002-6309-4732.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023

Научная статья

УДК 546.05

doi: 10.17223/7783494/1/11

Электровзрывной синтез наночастиц ZnO-Ag с высокой антибактериальной активностью

Ольга Владимировна Бакина¹, Елена Алексеевна Глазкова²,
Наталья Валентиновна Сваровская³, Александр Максимович Волков⁴,
Александр Борисович Ворожцов⁵, Марат Израильевич Лернер⁶

^{1, 2, 3, 6} *Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия*

⁴ *Сибирский государственный медицинский университет, Томск, Россия*

^{5, 6} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *ovbakina@ispms.ru*

² *eagl@ispms.tsc.ru*

³ *nsvs@ispms.tsc.ru*

⁴ *sancho_poncho@mail.ru*

⁵ *abv1953@mail.ru*

⁶ *lerner@ispms.tsc.ru*

Аннотация. Статья посвящена синтезу янус-наночастиц ZnO-Ag электрическим взрывом двух проволок в кислородосодержащей атмосфере. Установлено, что смещение полосы поглощения ZnO-Ag по сравнению с ZnO в видимую область спектра способствует более высокой фотохимической активности наночастиц при облучении видимым светом. Наночастицы ZnO-Ag проявляли высокую антибактериальную активность в отношении модельных и госпитальных штаммов, которая была выше или сравнима с препаратами на основе наночастиц серебра.

Ключевые слова: электрический взрыв проволок, наночастицы ZnO-Ag, фотокатализаторы, бикомпонентные наночастицы, антибактериальные наночастицы

Благодарности: исследование выполнено за счет проекта государственного задания ИФПМ СО РАН FWRW-2021-0007.

Для цитирования: Бакина О.В., Глазкова Е.А., Сваровская Н.В., Волков А.М., Ворожцов А.Б., Лернер М.И. Электровзрывной синтез наночастиц ZnO-Ag с высокой антибактериальной активностью // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 82–90. doi: 10.17223/7783494/1/11

Original article

doi: 10.17223/7783494/1/11

Electroexplosive synthesis of ZnO-Ag nanoparticles with high antibacterial activity

Olga V. Bakina¹, Elena A. Glazkova², Natalia V. Svarovskaya³,
Alexandr M. Volkov⁴, Alexandr B. Vorozhtsov⁵, Marat I. Lerner⁶

^{1, 2, 3, 6} *Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

⁴ *Siberian State Medical University, Tomsk, Russian Federation*

^{5, 6} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *ovbakina@ispms.ru*

² *eagl@ispms.tsc.ru*

³ *nsvs@ispms.tsc.ru*

⁴ *sancho_poncho@mail.ru*

⁵ *abv1953@mail.ru*

⁶ *lerner@ispms.tsc.ru*

Abstract. The article describes the synthesis of Janus-like ZnO-Ag nanoparticles by electric explosion of two wires in an oxygen-containing atmosphere. The higher photochemical activity of nanoparticles under visible light irradiation is due to the shift of the optical absorption band edge of ZnO-Ag nanoparticles compared to ZnO nanoparticles. ZnO-Ag nanoparticles showed high antibacterial activity against standard and hospital strains. The antibacterial activity of the nanoparticles was higher or comparable to colloidal silver nanoparticles.

Keywords: electrical explosion of wires, ZnO-Ag nanoparticles, photocatalysts, bicomponent nanoparticles, antibacterial nanoparticles

Acknowledgments: The study is funded by the Government research assignment for ISPMS SB RAS, project FWRW-2021-0007.

For citation: Bakina, O.V., Glazkova, E.A., Svarovskaya, N.V., Volkov, A.M., Vorozhtsov, A.B. & Lerner, M.I. (2023) Electroexplosive synthesis of ZnO-Ag nanoparticles with high antibacterial activity. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 82–90. doi: 10.17223/7783494/1/11 (In Russian).

Введение

В настоящее время проблема распространения нозокомиальных инфекций до сих пор остается актуальной, несмотря на стремительное развитие науки и технологий. По данным отчета Всемирной организации здравоохранения, ежегодно в мире от бактериальных инфекций погибает свыше 700 тыс. чел., что связано, в первую очередь, с нарушением мероприятий по локализации и предотвращению внутрибольничных инфекций. В связи с этим создание антимикробных композиционных материалов и покрытий, содержащих активные наночастицы, в настоящее время является перспективным и наиболее интенсивно развивающимся направлением индустрии наносистем.

Анализ механизмов взаимодействия наночастиц (НЧ) с бактериальной клеткой показывает, что антимикробные частицы должны обладать положительным зарядом поверхности для улучшения адгезии к бактериальным клеткам [1,2], способностью генерировать ионы [3] или активные формы кислорода [4].

Обобщение данных о минимальных подавляющих концентрациях (МПК) наночастиц в отношении основных патогенов возбудителей гнойных инфекций, приведенное в обзоре [5], показало, что наибольшей активностью обладают НЧ серебра. Значения МПК(Ag) в отношении бактерий *E. coli* составили по различным данным от 40 до 230 мкг/мл, MRSA – от 10 до 212 мкг/мл, *S. aureus* и *P. aeruginosa* – от 40 до 50 мкг/мл. Значения МПК НЧ меди и оксида меди в отношении исследованных штаммов превышали 2500 мкг/мл, НЧ ZnO ингибируют рост бактерий при концентрациях выше 40 мкг/мл.

Оксид цинка ZnO представляет собой полупроводник *n*-типа, характеризуется высокой химической стабильностью, улучшенными фотоэлектронными свойствами, антимикробной активностью, низкой токсичностью и невысокой стоимостью [6]. Среди многих других полупроводников ZnO является наиболее многообещающим генератором активных форм кислорода (АФК). Большим преимуществом является то, что ZnO поглощает свет в УФ- и видимой области. Кроме того, ZnO имеет более высокую подвижность носителей заряда и большее время жизни электронов по сравнению,

например, с TiO₂ [7], в связи с чем считается перспективным материалом для использования в устройствах преобразования солнечной энергии [8]. Высокая активность наночастиц ZnO, обладающих низкой токсичностью, обеспечивается их способностью генерировать АФК, которые вызывают перекисное окисление липидов, разрушение или модификацию белков, разрушение ферментов и повреждение молекул рибонуклеиновой кислоты, приводящие к гибели клеток.

Модификация наночастиц ZnO другими элементами перспективна для улучшения его оптических, электрических и антибактериальных свойств. Согласно недавно опубликованным данным, импрегнация фотокатализаторов благородными металлами, в частности, наночастицами серебра, приводила к улучшению фотокаталитических характеристик разложения нитросоединений и других загрязняющих веществ [9,10]. Этот эффект обусловлен эффективным разделением заряда в присутствии атомов благородных металлов, в результате чего увеличивается количество активных центров. Серебро действует как сток электронов, фотоиндуцированных при облучении ZnO, а образовавшаяся дырка индуцирует образование гидроксильных радикалов для фотохимического уничтожения бактерий [11]. Кроме того, само по себе серебро эффективно ингибирует рост грамотрицательных и грамположительных бактерий. Таким образом, при сочетании Ag с ZnO может иметь место синергетический эффект, что значительно усилит антибактериальную активность материалов для широкого спектра применений. Подобные эффекты фотоиндуцированной дезинфекции наблюдались в работах [12, 13] для наночастиц Ag–ZnO, полученных химическим осаждением, в том числе методами «зеленой» химии [14–16]. Показано, что такая структура наночастиц позволяет одновременно использовать фотокаталитические свойства ZnO и плазмонные свойства Ag [17].

Таким образом, использование наночастиц ZnO-Ag дает потенциальную возможность для создания новых материалов и покрытий, активных в отношении широкого спектра микроорганизмов. Роль наноструктурного фактора может быть значительной и позволит направленно регулировать свойства материалов, привести к более эффективному подавлению

роста микроорганизмов, снизить концентрацию действующего вещества и, соответственно, его токсичность. Настоящая статья посвящена определению физико-химических и антибактериальных свойств наночастиц ZnO-Ag, синтезированных электрическим взрывом проволок из цинка и серебра.

Материалы и методы

Бикомпонентные наночастицы ZnO-Ag были синтезированы совместным электрическим взрывом двух свитых проволок из цинка и серебра в кислородсодержащей атмосфере (80% об. Ag + 20% об. O₂). Принципиальная схема установки для синтеза НЧ представлена на рис. 1 [18].

Для получения НЧ были выбраны следующие параметры электрического взрыва: диаметр проволок d_{Zn} и d_{Ag} составил 0,38 и 0,15 мм соответственно; длина проволок – 90 мм; разрядное напряжение U составило 23 кВ; емкость конденсаторов – 3,2 мкФ. Количественный состав наночастиц составлял 12% ат. Ag и 88% ат. ZnO. Ранее нами уже было по-

казано, что данное соотношение обеспечивает высокую фотохимическую и антибактериальную активность НЧ ZnO-Ag [19].

Бикомпонентные НЧ ZnO-Ag были охарактеризованы методами просвечивающей электронной микроскопии ПЭМ (JEM-2100, JEOL, Япония) с интегрированной системой энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДС) X-Max (Oxford Instruments, Великобритания), рентгеновской дифракции с использованием $CuK\alpha$ ($\lambda = 1,514 \text{ \AA}$) излучения (XRD-6000, Shimadzu, Япония). Удельную поверхность определяли методом низкотемпературной сорбции / десорбции азота в диапазоне относительных давлений 0,05–0,35 на автоматическом анализаторе «Сорбтометр М» («Катакон», Россия). Распределение наночастиц по размерам определяли методом седиментации на дисковой центрифуге CPS DS24000 (CPS Instruments, США). Спектр поглощения наночастиц в УФ-видимой области измеряли с помощью спектрофотометра СФ-2000 (Россия), с длиной оптического пути кюветы 10 мм.

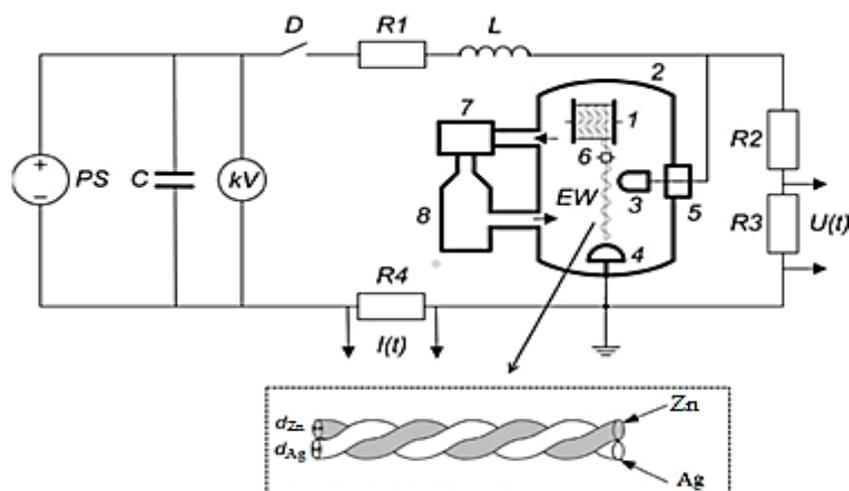


Рис. 1. Схема установки ЭВП

Fig. 1. Scheme of EEW equipment

Для исследования антибактериальной активности объектов использовали модельные штаммы *Staphylococcus aureus* (шт. ATCC № 6538-P), *Escherichia coli* (шт. ATCC № 25922) и штаммы возбудителей больничных инфекций (клинические штаммы) *Pseudomonas aeruginosa*, *Acinetobacter baumannii*, *Enterococcus faecalis*, *Klebsiella pneumoniae*. Ампулы с микроорганизмами открывали в условиях ламинарного бокса и производили посев в пробирки с соответствующей питательной средой. Через 18–20 ч инкубации при температуре $37 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ культуры высевали на чашки Петри с соответствующим агаром для выделения типичных колоний. После 24 ч инкубации культуры пересевали в

пробирки с агаром Мюллера–Хинтона (НИЦФ, Россия) и выращивали 18 ± 3 ч при $37 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Окончательная концентрация клеток составляла 2×10^6 КОЕ/мл. Суспензию бактерий использовали не более 30 мин после разведения для сохранения жизнеспособности клеток. Антибактериальную активность НЧ оценивали по величине минимальной концентрации, подавляющей рост исследуемых микроорганизмов (МПК). Для ее определения использовали стандартный суспензионный метод в вариации микропланшетной методики [20]. Для этого готовили суспензию НЧ в питательном бульоне Мюллера–Хинтона (Sigma, США) с концентрацией 500 мкг/мл, которую последовательно разводили в 2, 8, 16, 32, 64, 128,

256 раз тем же бульоном. В каждую лунку 96-луночного микропланшета вводили по 150 мкл бульона, 30 мкл суспензии бактерий в концентрации 10^6 КОЕ/мл и по 20 мкл суспензии НЧ выбранной концентрации. Через 24 ч инкубирования содержимое лунок высевали на чашки Петри, содержащие агар. Антибактериальную активность НЧ оценивали путем сравнения количества бактерий до и после инкубирования с НЧ. МПК определяли как минимальную концентрацию, останавливающую рост тестируемых бактерий. Все исследования проводили в трех технических повторностях.

Результаты и обсуждение

Электрический взрыв проволок происходит при температурах, превышающих энергии сублимации металлов. При температурах более $1\ 200\ ^\circ\text{C}$ в инерт-

ной атмосфере, исходя из данных фазовой диаграммы системы Zn-Ag, металлы могут неограниченно растворяться друг в друге с образованием интерметаллидов. В кислородсодержащей атмосфере образование наночастиц, вероятно, происходит одновременно с окислением цинка. Оксид цинка кристаллизуется уже при $1\ 975\ ^\circ\text{C}$, а серебро с более низкой температурой плавления ($962\ ^\circ\text{C}$) вытесняется из объема образующейся частицы, что приводит к разделению компонентов. В результате образуются частицы со структурой янус-наночастиц (рис. 2). Наночастицы ZnO-Ag преимущественно огранены, однако компоненты НЧ различаются по контрасту. Как показал ЭДС-анализ (рис. 3, а), электронно-плотные фрагменты обогащены серебром, а гексагональные фрагменты обогащены цинком и кислородом, т.е. являются оксидом цинка.

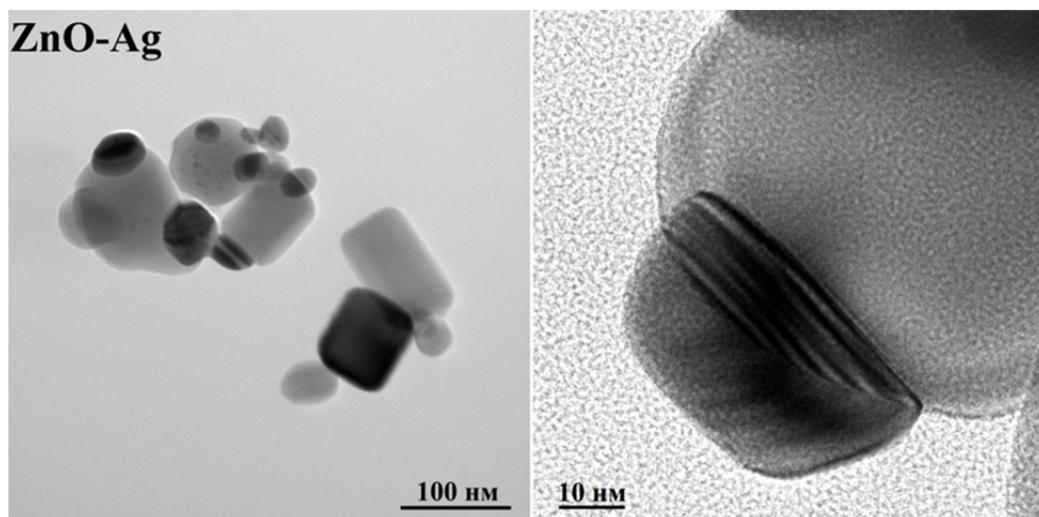


Рис. 2. ПЭМ-изображения НЧ ZnO-Ag при различном увеличении

Fig. 2. TEM image of ZnO-Ag NPs at various magnifications

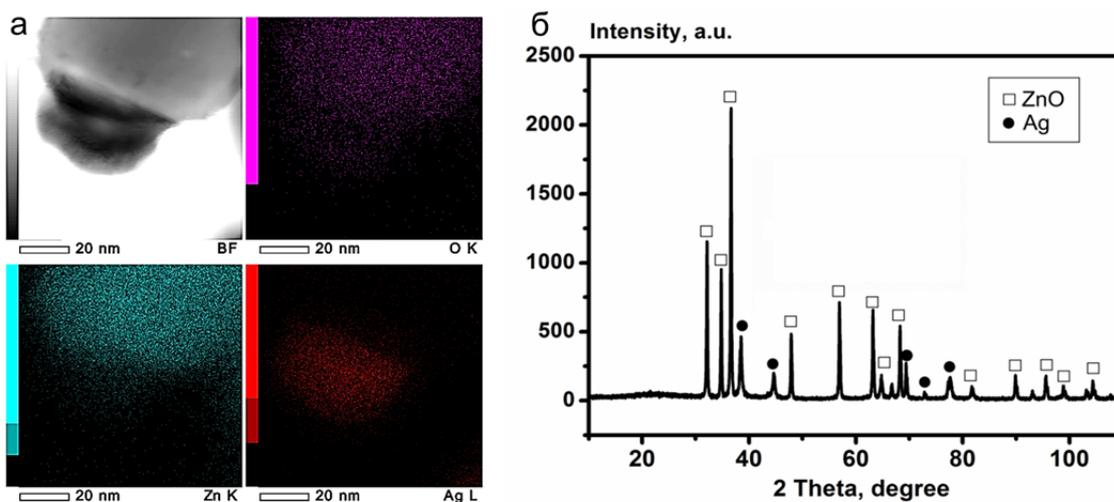


Рис. 3. ПЭМ-изображение в режиме картирования (а) и дифрактограмма (б) НЧ ZnO-Ag

Fig. 3. EDX analysis (a) and (b) diffractogram of ZnO-Ag NPs

Дифрактограмма образца (рис. 3, *b*) содержит пики, соответствующие гексагональной структуре вюрцита ZnO (карточка PDF 01-075-0576). Хорошо разрешенные дифракционные пики, расположенные при углах дифракции $2\theta = 38,2^\circ$, $44,4^\circ$, $64,6^\circ$ и $77,6^\circ$, соответствуют плоскостям (111), (200), (220) и (311) гранецентрированной кубической решетки серебра (карточка PDF 01-071-3762). Других кристаллических примесей в образце не наблюдается. Кроме того, отсутствие заметного сдвига дифракционных пиков на дифрактограмме указывает, что атомы серебра не внедрились в решетку ZnO. Усредненный размер серебросодержащих фрагментов, рассчитанный методом Уильямсона–Холла, составил 25 ± 5 нм.

Среднечисленный размер НЧ ZnO-Ag, по данным седиментационного метода, составил 66 ± 4 нм. Удельная поверхность наночастиц составила $8,2 \text{ м}^2/\text{г}$, дзета-потенциал – $12,2 \pm 0,2$ мВ.

УФ-видимые спектры водной суспензии НЧ записывали в диапазоне длин волн от 200 до 800 нм (рис. 4). Для сравнения на рисунке приведен спектр НЧ ZnO, полученных электрическим взрывом цинковой проволоки в кислородсодержащей атмосфере. Интенсивный пик поглощения при 375 нм, присутствующий в обоих спектрах, указывает на ширину запрещенной зоны объектов около 3 эВ. Однако пик поглощения образца ZnO-Ag имеет плечо со смещением края полосы поглощения до 470 нм, что говорит о снижении энергетического барьера возбуждения части электронов до 2,5 эВ. Расширение в видимую область спектров поглощения НЧ ZnO-Ag, по сравнению с наночастицами ZnO, должно способствовать фотохимической активации бикомпонентных НЧ видимым светом [21] и увеличить их способность к фотохимической дезинфекции [22].

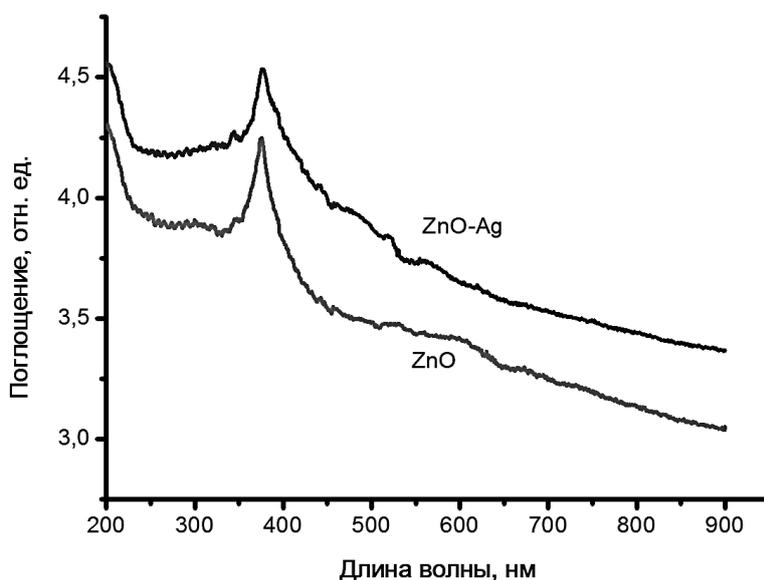


Рис. 4. Спектр поглощения НЧ ZnO и ZnO-Ag

Fig. 4. UV-Vis spectra of ZnO and ZnO-Ag NPs

Минимальную подавляющую концентрацию (МПК) НЧ определяли в аэробных условиях суспензионным методом в микропланшете. Для сравнения определяли МПК НЧ ZnO, полученных электрическим взрывом цинковой проволоки в кислородсодержащей атмосфере, и стандартных серебросодержащих препаратов: протеината серебра (Sigma-Aldrich, США) и раствора коллоидного серебра (Lextor protalor solution, Esko-Farm LLC, Армения). Полученные данные приведены на рис. 5.

Как следует из полученных данных, для НЧ ZnO-Ag (свет), находящихся под действием видимого света, значения МПК меньше (бактерии *E. coli*, *A. baumannii*, *A. faecalis*, *K. pneumonia*) либо соответствуют значению МПК для протеината серебра. В отношении бак-

терий *E. coli* МПК наночастиц ZnO-Ag ($62,5 \text{ мкг/мл}$), полученных электрическим взрывом, меньше, чем МПК НЧ ZnO-Ag ($100\text{--}150 \text{ мкг/мл}$), полученных при последовательном химическом осаждении из солей цинка и серебра в работах [23, 24].

Высокую активность НЧ ZnO-Ag, полученных при ЭВП, можно объяснить плотным контактом, возникающим в отдельной наночастице на границе раздела фаз ZnO и Ag, образующимся в условиях совместного ЭВП в атмосфере аргона и кислорода. Такие условия, в отличие от методов химического осаждения, исключают наличие примесей на границе раздела фаз. Электроны, накопленные на серебре, могут переноситься к молекулам кислорода, адсорбированным на поверхности частиц, с образо-

ванием радикалов $\bullet\text{NO}_2$, $\bullet\text{OH}$. Фотоиндуцированные дырки способны реагировать с поверхностно-связанными молекулами воды с образованием гидроксильных радикалов $\bullet\text{OH}$, являющихся сильными окислителями для органических химических ве-

ществ и микроорганизмов [25]. Возможный антибактериальный механизм НЧ ZnO-Ag основан на окислении бактериальной мембраны $\bullet\text{OH}$ радикалами, которые являются основными окислителями для инактивации бактерий.

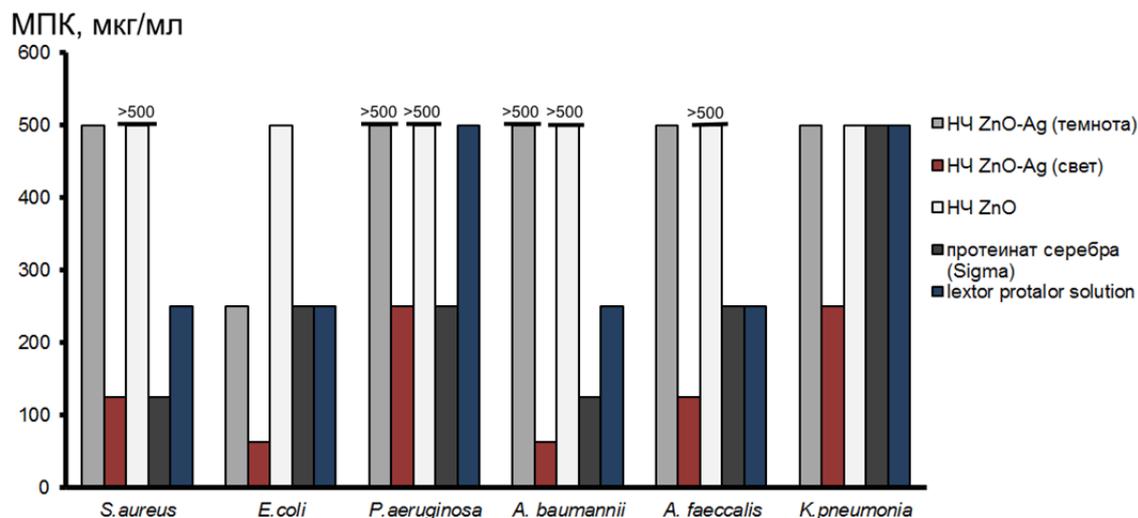


Рис. 5. Антибактериальная активность наночастиц

Fig. 5. Antibacterial activity of nanoparticles

Таким образом, повышенная антибактериальная активность НЧ ZnO-Ag может быть связана с двумя факторами. Ионы серебра способны высвобождаться с поверхности частицы, проникать через бактериальную мембрану, изменять её проницаемость и, возможно, также повреждать ДНК бактерий и клеточную мембрану. Вместе с этим серебро повышает активность выделения фотогенерируемых электронов, что приводит к образованию активных форм кислорода, которые вызывают гибель бактериальных клеток.

Выводы

1. Электрический взрыв 2 проволоки из цинка и серебра в кислородосодержащей атмосфере позволяет синтезировать наночастицы ZnO-Ag со структурой янус-наночастиц и средним размером 66 ± 4 нм.

2. Формирование янус-наночастиц ZnO-Ag предположительно происходит по следующему механизму. Первоначально наночастицы представляют со-

бой смесь цинка с серебром. При охлаждении частицы до температуры $1\ 975$ °С оксид цинка кристаллизуется, а жидкое серебро, температура плавления которого 962 °С, вытесняется из объема формирующейся наночастицы, что приводит к разделению компонентов.

3. Наночастицы ZnO-Ag проявляют более высокую или сравнимую антибактериальную активность по сравнению с наночастицами ZnO и препаратами на основе серебра под действием видимого света. Такой эффект позволяет снизить содержание серебра в антимикробных препаратах, что приведет к снижению их токсичности и стоимости.

4. Подавление жизнедеятельности бактерий НЧ ZnO-Ag осуществляется, вероятно, по двум механизмам: а) вследствие фотокаталитической генерации активных форм кислорода, б) за счет высвобождения ионов серебра. Такое антимикробное действие наночастиц будет препятствовать формированию резистентных штаммов микроорганизмов.

Список источников

1. Pillai P.P., Kowalczyk B., Kandere-Grzybowska K., Borkowska M., Grzybowski B.A. Engineering gram selectivity of mixed-charge gold nanoparticles by tuning the balance of surface charges // *Angewandte Chemie International Edition*. 2016. V. 55(30). P. 8610–8614. DOI: 10.1002/anie.201602965
2. Huo S., Jiang Y., Gupta A., Jiang Z., Landis R.F., Hou S., Rotello V.M. Fully zwitterionic nanoparticle antimicrobial agents through tuning of core size and ligand structure // *ACS nano*. 2016. V. 10(9). P. 8732–8737. DOI: 10.1021/acsnano.6b04207
3. Li W.R., Xie X.B., Shi Q.S., Zeng H.Y., Ou-Yang Y.S., Chen Y.B. Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on *Escherichia coli* // *Applied microbiology and biotechnology*. 2010. V. 85(4). P. 1115–1122. DOI: 10.1007/s00253-009-2159-5
4. Upadhyay G.K., Rajput J.K., Pathak T.K., Kumar V., Purohit L.P. Synthesis of ZnO: TiO₂ nanocomposites for photocatalyst application in visible light // *Vacuum*. 2019. V. 160. P. 154–163. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.11.026

5. Sánchez-López E., Gomes D., Esteruelas G., Bonilla L., Lopez-Machado A.L., Galindo R., Souto E.B. Metal-based nanoparticles as antimicrobial agents: an overview // *Nanomaterials*. 2020. V. 10(2). P. 292. DOI: 10.3390/nano10020292
6. Lee K.M., Lai C.W., Ngai K.S., Juan J.C. Recent developments of zinc oxide based photocatalyst in water treatment technology: a review // *Water research*. 2016. V. 88. P. 428–448. DOI: 10.1016/j.watres.2015.09.045
7. Kumar S., Pandit V., Bhattacharyya K., Krishnan V. Sunlight driven photocatalytic reduction of 4-nitrophenol on Pt decorated ZnO-RGO nanoheterostructures // *Materials Chemistry and Physics*. 2018. V. 214. P. 364–376. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.04.113
8. Viorica G.P., Musat V., Pimentel A., Calmeiro T.R., Carlos E., Baroiu L., Fortunato E. Hybrid (Ag) ZnO/Cs/PMMA nanocomposite thin films // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. V. 803. P. 922–933. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.373
9. Sharma V., Harith G., Kumar S., Sharma R., Reddy K.L., Bahuguna A., Krishnan V. Amorphous titania matrix impregnated with Ag nanoparticles as a highly efficient visible-and sunlight-active photocatalyst material // *Materials technology*. 2017. V. 32(8). P. 461–471. DOI: 10.1080/10667857.2016.1271861
10. Saravanan R., Karthikeyan N., Gupta V.K., Thirumal E., Thangadurai P., Narayanan V., Stephen A.J.M.S. ZnO/Ag nanocomposite: an efficient catalyst for degradation studies of textile effluents under visible light // *Materials Science and Engineering: C*. 2013. V. 33 (4). P. 2235–2244. DOI: 10.1016/j.msec.2013.01.046
11. Rokesh K., Mohan S.C., Karuppachamy S., Jothivenkatachalam K. Photo-assisted advanced oxidation processes for Rhodamine B degradation using ZnO–Ag nanocomposite materials // *Journal of environmental chemical engineering*. 2018. V. 6(3). P. 3610–3620. DOI: 10.1016/j.jece.2017.01.023
12. Burlibaşa L., Chifiriuc M.C., Lungu M.V., Lungulescu E.M., Mitrea S., Sbarcea G., Hermenean A. Synthesis, physico-chemical characterization, antimicrobial activity and toxicological features of AgZnO nanoparticles // *Arabian Journal of Chemistry*. 2020. V. 13(2). P. 4180–4197. DOI: 10.1016/j.arabjc.2019.06.015
13. Li Z., Zhang F., Meng A., Xie C., Xing J. ZnO/Ag micro/nanospheres with enhanced photocatalytic and antibacterial properties synthesized by a novel continuous synthesis method // *RSC Advances*. 2015. V. 5(1). P. 612–620. DOI: 10.1039/C5TC04152J
14. Thatikayala D., Banothu V., Kim J., Shin D.S., Vijayalakshmi S., Park J. Enhanced photocatalytic and antibacterial activity of ZnO/Ag nanostructure synthesized by Tamarindus indica pulp extract // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020. V. 31(7). P. 5324–5335. DOI: 10.1007/s10854-020-03093-4
15. Zare M., Namratha K., Alghamdi S., Mohammad Y.H.E., Hezam A., Zare M., Zhang X. Novel green biomimetic approach for synthesis of ZnO-Ag nanocomposite; antimicrobial activity against food-borne pathogen, biocompatibility and solar photocatalysis // *Scientific reports*. 2019. V. 9(1). P. 1–15. DOI: 10.1038/s41598-019-44309-w
16. El-Nahal I.M., Salem J., Anbar R., Kodeh F.S., Elmanama A. Preparation and antimicrobial activity of ZnO-NPs coated cotton/starch and their functionalized ZnO-Ag/cotton and Zn (II) curcumin/cotton materials // *Scientific reports*. 2020. V. 10(1). P. 1–10. DOI: 10.1038/s41598-020-61306-6
17. Seong S., Park I.S., Jung Y.C., Lee T., Kim S.Y., Park J.S., Ahn J. Synthesis of Ag-ZnO core-shell nanoparticles with enhanced photocatalytic activity through atomic layer deposition // *Materials & Design*. 2019. V. 177. P. 107831. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107831
18. Lerner M.I., Pervikov A.V., Glazkova E.A., Svarovskaya N.V., Lozhkomoev A.S., Psakhie S.G. Structures of binary metallic nanoparticles produced by electrical explosion of two wires from immiscible elements // *Powder Technology*. 2016. V. 288. P. 371–378. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.11.037
19. Bakina O.V., Glazkova E.A., Pervikov A.V., Rodkevich N.G., Vornakova E.A., Chzhou V.R., Lerner M.I. Electric explosion of wires as versatile method for antibacterial Janus-like ZnO–Ag nanoparticles preparation // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021. V. 32(8). P. 10623–10634. DOI: 10.1007/s10854-021-05718-8
20. Markova Z., Šišková K.M., Filip J., Čuda J., Kolář M., Šafářová K., Zbořil R. Air stable magnetic bimetallic Fe–Ag nanoparticles for advanced antimicrobial treatment and phosphorus removal // *Environmental science & technology*. 2013. V. 47(10). P. 5285–5293. DOI: 10.1021/es304693g
21. Alharth F.A., Alghamdi A.A., Al-Zaqri N., Alanazi H.S., Alsyahi A.A., Marghany A.E., Ahmad N. Facile one-pot green synthesis of Ag–ZnO Nanocomposites using potato peel and their Ag concentration dependent photocatalytic properties // *Scientific Reports*. 2020. V. 10(1). P. 1–14. DOI: 10.1038/s41598-020-77426-y
22. Primo J.D.O., Horsth D.F., Correa J.D.S., Das A., Bittencour, C., Umek P., Anaissi F.J. Synthesis and Characterization of Ag/ZnO Nanoparticles for Bacteria Disinfection in Water // *Nanomaterials*. 2022. V. 12(10). P. 1764. DOI: 10.3390/nano12101764
23. Panwar A., Yadav K.L., Yadav K.L. Silver doped zinc oxide nanostructures with antibacterial properties against GFP-expressing antibiotic resistant *Escherichia coli* // *Materials Letters*. 2022. V. 309. P. 131469. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131469
24. Li Z., Zhang F., Meng A., Xie C., Xing J. ZnO/Ag micro/nanospheres with enhanced photocatalytic and antibacterial properties synthesized by a novel continuous synthesis method // *RSC Advances*. 2015. V. 5(1). P. 612–620. DOI: 10.1039/C4RA12319K
25. Essawy A.A., Alsohaimi I.H., Alhumaimess M.S., Hassan H.M., Kamel M.M. Green synthesis of spongy Nano-ZnO productive of hydroxyl radicals for unconventional solar-driven photocatalytic remediation of antibiotic enriched wastewater // *Journal of Environmental Management*. 2020. V. 271. P. 110961. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110961

References

1. Pillai, P.P., Kowalczyk, B., Kandere-Grzybowska, K., Borkowska, M. & Grzybowski, B.A. (2016) Engineering gram selectivity of mixed-charge gold nanoparticles by tuning the balance of surface charges. *Angewandte Chemie International Edition*. 55(30), pp. 8610–8614. DOI: 10.1002/anie.201602965
2. Huo, S., Jiang, Y., Gupta, A., Jiang, Z., Landis, R.F., Hou, S. & Rotello V.M. (2016) Fully zwitterionic nanoparticle antimicrobial agents through tuning of core size and ligand structure. *ACS nano*. 10(9), pp. 8732–8737. DOI: 10.1021/acsnano.6b04207
3. Li, W.R., Xie, X.B., Shi, Q.S., Zeng, H.Y., Ou-Yang, Y.S. & Chen, Y.B. (2010) Antibacterial activity and mechanism of silver nanoparticles on *Escherichia coli*. *Applied microbiology and biotechnology*. 85(4), pp. 1115–1122. DOI: 10.1007/s00253-009-2159-5
4. Upadhyay, G.K., Rajput, J.K., Pathak, T.K., Kumar, V. & Purohit, L.P. (2019) Synthesis of ZnO: TiO₂ nanocomposites for photocatalyst application in visible light. *Vacuum*. 160, pp. 154–163. DOI: 10.1016/j.vacuum.2018.11.026

5. Sanchez-Lopez, E., Gomes, D., Esteruelas, G., Bonilla, L., Lopez-Machado, A.L., Galindo, R. & Souto, E.B. (2020) Metal-based nanoparticles as antimicrobial agents: an overview. *Nanomaterials*. 10(2). pp. 292. DOI: 10.3390/nano10020292
6. Lee, K.M., Lai, C.W., Ngai, K.S., Juan, J.C. (2016) Recent developments of zinc oxide based photocatalyst in water treatment technology: a review. *Water Research*. 88. pp. 428–448. DOI: 10.1016/j.watres.2015.09.045
7. Kumar, S., Pandit, V., Bhattacharyya, K. & Krishnan, V. (2018) Sunlight driven photocatalytic reduction of 4-nitrophenol on Pt decorated ZnO-RGO nanoheterostructures. *Materials Chemistry and Physics*. 214. pp. 364–376. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.04.113
8. Viorica, G.P., Musat, V., Pimentel, A., Calmeiro, T.R., Carlos, E., Baroiu, L. & Fortunato, E. (2019) Hybrid (Ag) ZnO/Cs/PMMA nanocomposite thin films. *Journal of Alloys and Compounds*. 803. pp. 922–933. DOI: 10.1016/j.jallcom.2019.06.373
9. Sharma, V., Harith, G., Kumar, S., Sharma, R., Reddy, K.L., Bahuguna, A., Krishnan, V. (2017) Amorphous titania matrix impregnated with Ag nanoparticles as a highly efficient visible-and sunlight-active photocatalyst material. *Materials Technology*. 32(8). pp. 461–471. DOI: 10.1080/10667857.2016.1271861
10. Saravanan, R., Karthikeyan, N., Gupta, V.K., Thirumal, E., Thangadurai, P., Narayanan, V., Stephen, A.J.M.S. (2013) ZnO/Ag nanocomposite: an efficient catalyst for degradation studies of textile effluents under visible light. *Materials Science and Engineering: C*. 33(4). pp. 2235–2244. DOI: 10.1016/j.msec.2013.01.046
11. Rokesh, K., Mohan, S.C., Karuppachamy, S. & Jothivenkatachalam, K. (2018) Photo-assisted advanced oxidation processes for Rhodamine B degradation using ZnO–Ag nanocomposite materials. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 6(3). pp. 3610–3620. DOI: 10.1016/j.jece.2017.01.023
12. Burlibaşa, L., Chifiriuc, M.C., Lungu, M.V., Lungulescu, E.M., Mitrea, S., Sbarcea, G. & Hermenean, A. (2020) Synthesis, physico-chemical characterization, antimicrobial activity and toxicological features of AgZnO nanoparticles. *Arabian Journal of Chemistry*. 13(2). pp. 4180–4197. DOI: 10.1016/j.arabjc.2019.06.015
13. Li, Z., Zhang, F., Meng, A., Xie, C. & Xing, J. (2015) ZnO/Ag micro/nanospheres with enhanced photocatalytic and antibacterial properties synthesized by a novel continuous synthesis method. *RSC Advances*. 5(1). pp. 612–620. DOI: 10.1039/C5TC04152J
14. Thatikayala, D., Banothu, V., Kim, J., Shin, D.S., Vijayalakshmi, S. & Park, J. (2020) Enhanced photocatalytic and antibacterial activity of ZnO/Ag nanostructure synthesized by Tamarindus indica pulp extract. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 31(7). pp. 5324–5335. DOI: 10.1007/s10854-020-03093-4
15. Zare, M., Namratha, K., Alghamdi, S., Mohammad, Y. H. E., Hezam, A., Zare, M. & Zhang, X. (2019). Novel green biomimetic approach for synthesis of ZnO–Ag nanocomposite; antimicrobial activity against food-borne pathogen, biocompatibility and solar photocatalysis. *Scientific Reports*. 9(1). pp. 1–15. DOI: 10.1038/s41598-019-44309-w
16. El-Nahhal, I.M., Salem, J., Anbar, R., Kodeh, F.S. & Elmanama, A. (2020) Preparation and antimicrobial activity of ZnO-NPs coated cotton/starch and their functionalized ZnO-Ag/cotton and Zn (II) curcumin/cotton materials. *Scientific Reports*. 10(1). pp. 1–10. DOI: 10.1038/s41598-020-61306-6
17. Seong, S., Park, I.S., Jung, Y.C., Lee, T., Kim, S.Y., Park, J.S. & Ahn, J. (2019) Synthesis of Ag-ZnO core-shell nanoparticles with enhanced photocatalytic activity through atomic layer deposition. *Materials & Design*. 177. pp. 107831. DOI: 10.1016/j.matdes.2019.107831
18. Lerner, M.I., Pervikov, A.V., Glazkova, E.A., Svarovskaya, N.V., Lozhkomoev, A. S. & Psakhie, S.G. (2016) Structures of binary metallic nanoparticles produced by electrical explosion of two wires from immiscible elements. *Powder Technology*. 288. pp. 371–378. DOI: 10.1016/j.powtec.2015.11.037
19. Bakina, O.V., Glazkova, E.A., Pervikov, A.V., Rodkevich, N.G., Vornakova, E.A., Chzhou, V.R. & Lerner, M.I. (2021) Electric explosion of wires as versatile method for antibacterial Janus-like ZnO–Ag nanoparticles preparation. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 32(8). pp. 10623–10634. DOI: 10.1007/s10854-021-05718-8
20. Markova, Z., Šišková, K.M., Filip, J., Čuda, J., Kolář, M., Šafářová, K. & Zbořil, R. (2013) Air stable magnetic bimetallic Fe–Ag nanoparticles for advanced antimicrobial treatment and phosphorus removal. *Environmental Science & Technology*. 47(10). pp. 5285–5293. DOI: 10.1021/es304693g
21. Alharth, F.A., Alghamdi, A.A., Al-Zaqri, N., Alanazi, H.S., Aalsyahi, A.A., Marghany, A.E. & Ahmad, N. (2020) Facile one-pot green synthesis of Ag–ZnO Nanocomposites using potato peel and their Ag concentration dependent photocatalytic properties. *Scientific Reports*. 10(1). pp. 1–14. DOI: 10.1038/s41598-020-77426-y
22. Primo, J.D.O., Horsth, D.F., Correa, J.D.S., Das, A., Bittencour, C., Umek, P. & Anaissi, F.J. (2022) Synthesis and Characterization of Ag/ZnO Nanoparticles for Bacteria Disinfection in Water. *Nanomaterials*. 12(10). pp. 1764. DOI: 10.3390/nano12101764
23. Panwar, A., Yadav, K.L. & Yadav, K.L. (2022) Silver doped zinc oxide nanostructures with antibacterial properties against GFP-expressing antibiotic resistant Escherichia Coli. *Materials Letters*. 309. p. 131469. DOI: 10.1016/j.matlet.2021.131469
24. Li, Z., Zhang, F., Meng, A., Xie, C. & Xing, J. (2015) ZnO/Ag micro/nanospheres with enhanced photocatalytic and antibacterial properties synthesized by a novel continuous synthesis method. *RSC Advances*. 5(1). pp. 612–620. DOI: 10.1039/C4RA12319K
25. Essawy, A.A., Alsohaimi, I.H., Alhumaimess, M.S., Hassan, H.M. & Kamel, M.M. (2020) Green synthesis of spongy Nano-ZnO productive of hydroxyl radicals for unconventional solar-driven photocatalytic remediation of antibiotic enriched wastewater. *Journal of Environmental Management*. 271. pp. 110961. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110961

Информация об авторах:

Бакина Ольга Владимировна – доктор технических наук, старший научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения (Томск, Россия). E-mail: ovbakina@ispms.tsc.ru

Глазкова Елена Алексеевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения (Томск, Россия). E-mail: eagl@ispms.tsc.ru

Сваровская Наталья Валентиновна – кандидат химических наук, старший научный сотрудник Института физики прочности и материаловедения (Томск, Россия). E-mail: nvsv@ispms.tsc.ru

Волков Александр Максимович – студент Сибирского государственного медицинского университета (Томск, Россия). E-mail: sancho_poncho@mail.ru

Ворожцов Александр Борисович – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: abv1953@mail.ru

Лернер Марат Израильевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией физикохимии высокодисперсных материалов Института физики прочности и материаловедения (Томск, Россия), главный научный сотрудник лаб. нанотехнологий металлургии Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: lerner@ispms.tsc.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Bakina Olga V., Dr.Sc. (Engineering), senior researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: ovbakina@ispms.tsc.ru

Glazkova Elena A., Cans.Sc. (Engineering), senior researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: eagl@ispms.tsc.ru

Svarovskaya Natalia V., Cand.Sc. (Chemistry), senior researcher, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation). E-mail: nvsv@ispms.tsc.ru

Volkov Alexandr M., student of the Siberian State Medical University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: sancho_poncho@mail.ru

Vorozhtsov Alexandr B., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Rector for Research and Innovation, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: abv1953@mail.ru

Lerner Marat I., Dr.Sc. (Engineering), head of laboratory, Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russian Federation); Chief Researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: lerner@ispms.tsc.ru

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КИБЕР- И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

ENSURING CYBER AND INFORMATION SECURITY

Научная статья
УДК 621.316
doi: 10.17223/7783494/1/12

Силовая GaN-электроника как фактор роста энергоэффективности преобразователей электрической энергии

Бартенев Александр Иванович¹, Кагадей Валерий Алексеевич², Коряковцев Артём Сергеевич³,
Полынцев Егор Сергеевич⁴, Помазанов Алексей Владимирович⁵,
Проказина Ирина Юрьевна⁶, Шеерман Федор Иванович⁷

^{1, 3, 5, 7} *Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия*

^{2, 4, 6} *Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

¹ *san4ubas1@gmail.com*

² *vak@mail.tsu.ru*

³ *artem.s.koriakovtsev@tusur.ru*

⁴ *e.polyntsev@gmail.com*

⁵ *aleksei.v.pomazanov@tusur.ru*

⁶ *irina_tusur@mail.ru*

⁷ *fish@tusur.ru*

Аннотация. Показано, что переход от силовой Si-электроники к силовой GaN-электронике является действенным методом, обеспечивающим рост энергоэффективности преобразователей электрической энергии. Проведен сравнительный анализ эффективности оборудования силовой электроники на основе Si и GaN, а также показаны текущее состояние и тренды развития дискретных силовых транзисторов и силовых интегральных схем (ИС) на основе GaN. Показано, что переход к GaN ИС является одним из базовых трендов развития силовой микроэлектроники. Представлены результаты разработки силовых GaN-интегральных схем на основе гетероструктур GaN/SOI с напряжением 650 и 200 В.

Ключевые слова: энергоэффективность, силовая GaN-электроника, монолитная интеграция, GaN/SOI, полумост

Благодарности: работа была выполнена при финансовой поддержке ФГБУ «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере», договор № 445ГР/64870 от 24.12.2020 г. и 41ГУРЭС14/72791 от 26 декабря 2021 г. Авторы выражают благодарность Центру коллективного проектирования ЭКБ и РЭА НИ МИЭТ за предоставление доступа к лицензионному САПР и вычислительной инфраструктуре. Авторы также выражают благодарность Миллеру Андрею Ивановичу за консультации и поддержку.

Для цитирования: Бартенев А.И., Кагадей В.А., Коряковцев А.С., Полынцев Е.С., Помазанов А.В., Проказина И.Ю., Шеерман Ф.И. Силовая GaN-электроника как фактор роста энергоэффективности преобразователей электрической энергии // Технологии безопасности жизнедеятельности. 2023. № 1. С. 91–100. doi: 10.17223/7783494/1/12

Original article
doi: 10.17223/7783494/1/12

GaN power electronics as a driver of energy efficiency growth in electrical energy converters

Aleksandr I. Bartenev¹, Valery A. Kagadey², Artyom S. Koryakovtsev³, Egor S. Polyntsev⁴,
Aleksei V. Pomazanov⁵, Irina Y. Prokazina⁶, Feodor I. Sheyerman⁷

^{1, 3, 5, 7} *Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, Russian Federation*

^{2, 4, 6} *National Research Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

¹ *san4ubas1@gmail.com*

² *vak@mail.tsu.ru*

³ *artem.s.koriakovtsev@tusur.ru*

⁴ *e.polyntsev@gmail.com*

⁵ *aleksei.v.pomazanov@tusur.ru*

⁶ *irina_tusur@mail.ru*

⁷ *fish@tusur.ru*

Abstract. Exponential humanity growth forms new global challenges, such as efficient energy consumption. Transition from Si-based to GaN-based power electronics devices and systems was proposed as a way to increase energy efficiency. The profit from the transition to GaN-based devices was demonstrated as an increase in energy converters efficiency and reduction of mass and weight parameters on a system level. The review of the current state of the GaN commercial devices and systems was carried out. The discrete GaN/Si based depleted mode and enhanced mode HEMT are commercially available and widely used today. Vertical GaN/GaN transistors are not commercially available yet, but expected to enable extremely high breakdown voltages and high currents. The development and mass production of GaN ICs is one of the basic trends in the development of power GaN microelectronics. Nowadays power GaN IC are not widespread on a commercial market, due to early stage of technology development, as well as the lack of a number of necessary IC elements, such as a complementary pair of digital GaN transistors with *p*- and *n*-type channels and high-current GaN diodes. The results of development of four various power GaN integrated circuit based on the GaN/SOI technology platform are presented in the paper. A half-bridge IC with integrated driver and power e-mode HEMT for 650 V applications, a half-bridge gate driver IC and a single channel gate driver IC for 650V e-mode n-GaN HEMT were developed for high voltage operation basing on IMEC GANIC650SOI design kit. Basic electrical parameters of high voltage ICs and layout design are presented in the paper. The developed solutions were adopted for low-voltage operations basing on IMEC GANIC200SOI design kit. As a result, 200V half-bridge IC with on-chip drivers and power e-HEMT was developed. The use of GaN/SOI technological platform seems to be one of the effective methods for suppressing sidegating and backgating effects and obtaining ICs with improved characteristics.

Keywords: energy efficiency, GaN power electronics, monolithic integration, GaN/SOI, half-bridge

Acknowledgments: The work was carried out with the financial support of the Federal State Budgetary Institution “Foundation for the Promotion of the Development of Small Forms of Enterprises in the Scientific and Technical Sphere”, Agreement No. 445ГП/64870 dated December 24, 2020 and Agreement No. 41ГУПЭС/72791 dated December 26, 2021. The authors express their appreciation to Center for Collective Design of Electronic Component Base and Radioelectronics Equipment of National Research University of Electronic Technology for providing access to the licensed CAD and computing infrastructure. The authors express their gratitude to Andrey I. Miller.

For citation: Bartenev, A.I., Kagadey, V.A., Koryakovtsev, A.S., Polyntsev, E.S., Pomazanov, A.V., Prokazina, I.Y. & Sheyerman, F.I. (2023) GaN Power Electronics as a Driver of Energy Efficiency Growth in Electrical Energy Converters. *Tekhnologii bezopasnosti zhiznedeyatelnosti – Life Safety / Security Technologies*. 1. pp. 91–100. doi: 10.17223/7783494/1/12 (In Russian).

Введение

Известно, что в мировом энергетическом балансе доля электричества будет быстро расти в течение следующих 30 лет [1]. Планируется, что к 2050 г. в Европе электричество станет главным источником энергии, увеличив свою долю с 19 до 49% [2], а экономия электроэнергии станет одним из важных методов, обеспечивающих рост эффективности глобальной энергосистемы. В Российской Федерации одним из стратегических направлений приоритетного технологического развития также являются энергоэффективность и энергосбережение [3]. Все это свидетельствует о необходимости разработки и внедрения новых технологий, обеспечивающих дальнейший рост коэффициента полезного действия (КПД) оборудования генерации и потребления электроэнергии.

Эффективность преобразования электрической энергии во многом определяется типом и электрическими характеристиками электронной компонентной базы (ЭКБ), используемой в преобразователях энергии и вторичных источниках электропитания (ВИП). Активный прогресс в силовой ЭКБ на основе кремния (Si), который наблюдался в течение второй половины XX в., позволил к нулевым годам XXI в. достичь теоретического предела в характеристиках силовой ЭКБ на основе Si. В результате этого замедлился прирост КПД преобразователей и ВИП. Стало

очевидно, что дальнейший рост энергетической эффективности преобразования электрической энергии возможен только при переходе на принципиально новую ЭКБ.

В качестве перспективной ЭКБ сегодня рассматриваются полупроводниковые приборы на основе следующих широкозонных полупроводников: карбид кремния (SiC), нитрид галлия (GaN), оксид галлия (Ga₂O₃) и алмаз.

В настоящее время, хотя и в ограниченной номенклатуре, но уже стала коммерчески доступной ЭКБ на основе SiC и GaN. Согласно своим электрическим характеристикам, силовые диоды и транзисторы на основе SiC наиболее эффективны для применения в мощных (более 10 кВт) преобразователях и ВИП с рабочим напряжением более 1 200 В. Полупроводниковые приборы на основе GaN используются в оборудовании средней и малой мощности (менее 10 кВт) с напряжением до 1 200 В. Силовые транзисторы и диоды на основе Ga₂O₃ и алмаза пока находятся в стадии разработки и на рынке практически не представлены.

В настоящей работе кратко рассмотрены актуальные вопросы и тренды развития силовой ЭКБ на основе GaN, предназначенной для создания нового поколения энергопреобразующего оборудования с повышенным КПД, а также приведены примеры собственной разработки силовых GaN-интегральных схем.

Энергоэффективность оборудования силовой электроники на основе Si и GaN ЭКБ: сравнительный анализ

Перспективность применения дискретных полупроводниковых приборов и интегральных схем (ИС) на основе GaN в силовой электронике связана с лучшими по сравнению с кремнием электрофизическими параметрами материала: большей шириной запрещенной зоны, повышенными электрической прочностью, скоростью дрейфа электронов в режиме насыщения, а также потенциально высокой рабочей температурой и радиационной стойкостью [4–6]. Замена Si на GaN приводит к тому, что силовые транзисторы на основе AlGaN/GaN гетероструктур обладают большей плотностью тока, повышенной

скоростью переключения и сниженным сопротивлением в открытом состоянии [7]. В свою очередь, это позволяет существенно снизить все виды потерь в преобразователях энергии, а также уменьшить массогабаритные характеристики и осуществлять работу устройств в более экстремальных условиях эксплуатации. Если сравнивать универсальный показатель качества по Балиге (Baliga's figure of merit [8]), который определяет резистивные потери в канале полевого транзистора, то GaN-транзисторы демонстрируют показатель, в 34 раза превышающий показатель для Si и в три раза превышающий показатель для SiC [9]. Основные достоинства применения GaN-приборов и устройств в силовой электронике представлены на рис. 1.



Рис. 1. Преимущества GaN-приборов перед кремниевыми аналогами на электрофизическом, приборном и системном уровнях
 Fig. 1. Advantages of GaN devices over silicon counterparts at the electrophysical, device and system levels

В табл. 1 приведено сравнение эффективности DC-DC, AC-DC и DC-AC преобразователей энергии, построенных на традиционной кремниевой ЭКБ и на ЭКБ на основе широкозонных полупроводниковых материалов (GaN и SiC). Видно, что для всех видов преобразователей переход к ЭКБ на основе широкозонных полупроводниковых материалов позволяет поднять КПД энергопреобразующего оборудования.

Таблица 1
 КПД разных типов преобразователей, построенных с использованием Si ЭКБ, а также ЭКБ на основе широкозонных полупроводниковых материалов

Тип преобразователя	DC-DC	AC-DC	DC-AC
КПД преобразователя на основе Si ЭКБ, %	88	85	96
КПД преобразователя на основе GaN, SiC ЭКБ, %	95	90	99

Силовые GaN-транзисторы: состояние дел

Исторически первыми коммерчески доступными GaN-транзисторами стали нормально открытые (depletion mode, D-mode) планарные транзисторы с высокой подвижностью электронов (high electron mobility transistors, HEMTs), изготовленные на гетеро-

структурах GaN/Si. С точки зрения устройств силовой электроники они требовали применения дополнительного кремниевого транзистора в каскодном включении. Позднее появились так называемые каскодные транзисторы, сочетающие в одном корпусе нормально открытый силовой GaN/Si транзистор и кремниевый полевой транзистор.

Вслед за ними на рынке появились нормально закрытые (enhanced mode, E-mode) GaN/Si HEMTs. Они не требовали дополнительного Si-транзистора и обеспечивали закрытое состояние транзистора без подачи напряжения на затвор. Эти преимущества мотивировали начало процесса постепенного вытеснения с рынка D-mode HEMTs. Сегодня серийно производятся E-mode HEMTs с рабочим напряжением до 1 200 В [10] и током до 150 А [11].

На рис. 2 представлены теоретические зависимости (линии) и экспериментальные данные (закрашенные области) для удельного сопротивления открытого канала транзистора от напряжения пробоя для силовых транзисторов на основе Si, SiC и GaN, полученные в рамках лабораторных исследований. Показатель качества транзисторов растет от левого верхнего к правому нижнему углу. Видно, что при-

боры на основе Si достигли своих предельных значений, а приборы на основе GaN не только имеют наилучшие параметры, но и располагают потенциалом для дальнейшего совершенствования. Транзисторы на основе SiC занимают промежуточное положение между Si- и GaN-приборами.

В качестве приборов, перспективных для мощных и сверхмощных применений, сегодня рассматриваются вертикальные силовые GaN/GaN-транзисторы, которые пока находятся в стадии разработки [12]. Преимуществом вертикальных GaN/GaN-транзисторов по сравнению с планарными GaN/Si-транзисторами является высокое пробивное напряжение

(более 1 700 В) и большие плотности токов (до 1 000 А/см²) [12]. Вертикальные GaN-транзисторы, использующие эпитаксиальные структуры на основе монокристаллических подложек GaN, должны со временем позволить GaN-приборам приблизиться к теоретическому пределу своих электрических характеристик (рис. 2). Отсутствие высококачественных и недорогих GaN-подложек пока ограничивает перспективы массового промышленного производства вертикальных GaN-транзисторов. На рис. 3 представлены базовые конструкции планарного и вертикального GaN-транзисторов, а также направления протекания токов в них.

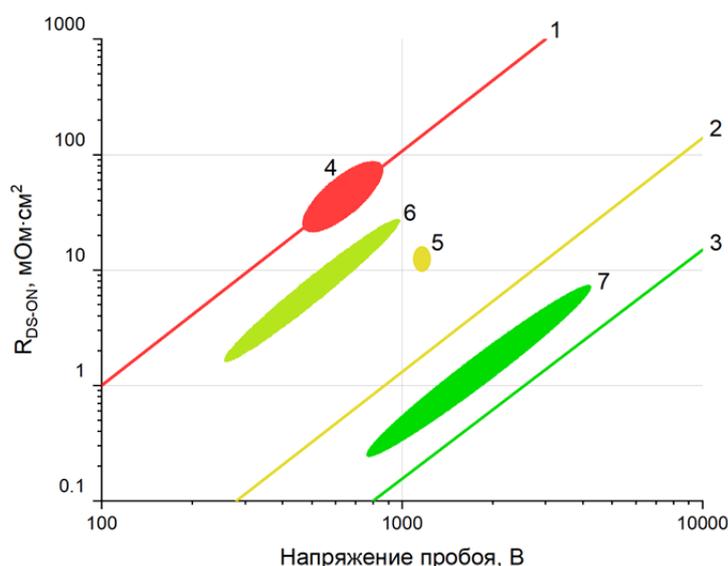


Рис. 2. Теоретические пределы для Si (1), SiC (2), GaN (3) силовых транзисторов, а также достигнутые экспериментальные значения параметров транзисторов на основе Si (4), SiC (5), GaN/Si (6), GaN/GaN (7)

Fig. 2. Theoretical limits for Si (1), SiC (2), GaN (3) power transistors and achieved experimental parameters of transistors based on Si (4), SiC (5), GaN/Si (6) and GaN/GaN (7)

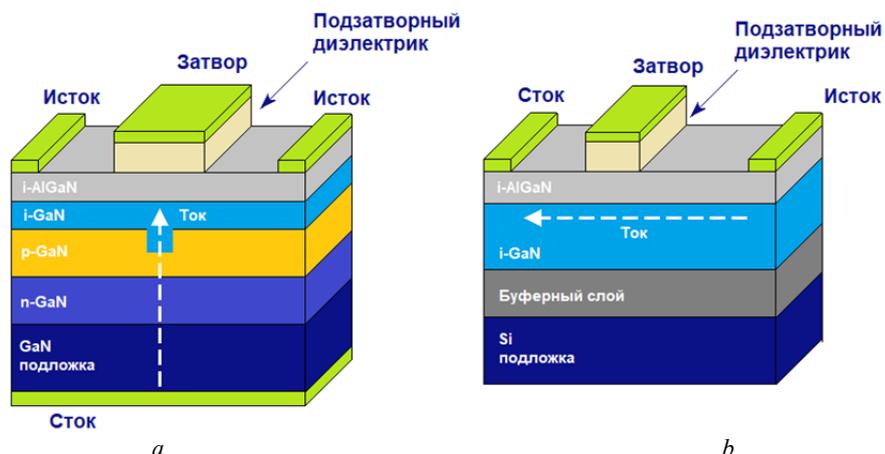


Рис. 3. Базовые конструкции GaN-транзисторов: а – вертикального на основе гетероструктуры GaN/GaN; б – планарного на основе гетероструктуры GaN/Si

Fig. 3. Conventional discrete GaN transistors structures: a – vertical GaN/GaN; b – lateral GaN/Si

В настоящее время проводятся активные исследования, направленные на получение планарных GaN/Si-транзисторов с каналом *p*-типа проводимости [14–16]. Разработка такого транзистора позволит создать комплементарную пару и использовать её в цифровых блоках GaN-интегральных схем драйверов управления силовыми GaN-транзисторами.

Силовые GaN-интегральные схемы: состояние дел

Разработка и освоение в массовом производстве GaN ИС является одним из базовых трендов развития силовой GaN-микроэлектроники. Это обусловлено тем фактом, что интеграция цифровой схемы управления, драйвера и силовых транзисторов на одном кристалле за счет миниатюризации межсоединений позволяет снизить паразитные емкости и индуктивности (уменьшить потери), что позволяет поднять КПД и рабочую частоту преобразования и, как следствие, уменьшить массогабаритные характеристики энергопреобразующего оборудования [17]. Кроме этого, интеграция всех элементов на одном кристалле позволяет увеличить надежность и снизить себестоимость финальных изделий.

В настоящее время на рынке представлено весьма ограниченное число типонаименований силовых GaN-ИС. Это обусловлено ранним этапом развития технологии, а также отсутствием ряда необходимых активных элементов ИС. К таковым относятся: комплементарная пара цифровых GaN-транзисторов с каналами *p*- и *n*-типа проводимости, сильноточные GaN-диоды и др. Одно из базовых конструкторско-технологических ограничений связано с необходимостью подавления высокого уровня взаимного влияния сильноточных сигналов выходных транзисторов друг на друга, а также на другие слаботочные сигналы, протекающие в ИС, т.е. с необходимостью подавления *sidegating*- и *backgating*-эффектов [18].

На сегодняшний день на рынке представлены гибридные интегральные схемы, объединяющие в одном корпусе кристалл драйвера управления на основе Si и кристаллы выходных силовых GaN-транзисторов. Примером такой схемы является полумост с высокой удельной мощностью MASTERGAN1 от компании STMicroelectronics [19]. Недостатком гибридной сборки является её повышенная (относительно монолитного исполнения) паразитная индуктивность, которая увеличивает коммутационные потери и снижает КПД преобразователя [20].

На рынке также доступны интегральные схемы в монолитном исполнении, это, например, LMG5200 (Texas Instruments) и EPC2152 (EPC), рассчитанные на рабочее напряжение 80 В [21–22]. Такое низкое рабочее напряжение ограничено взаимным влиянием

сигналов выходных ключевых транзисторов друг на друга. В начале 2022 г. было представлено пилотное решение от бельгийской компании MinDCet [23] – это GaN-ИС затворного драйвера MDC901, рассчитанная на напряжение до 200 В и обеспечивающая скорость нарастания напряжения до 100 В/нс.

Большинство ИС сегодня изготавливается на основе гетероструктур GaN/Si. Университет Фердинанда-Брауна (Ferdinand-Braun-Institut, Германия) использует гетероструктуры GaN/SiC, а Межуниверситетский микроэлектронный центр (IMEC, Бельгия) – гетероструктуры GaN-на кремнии-на диэлектрике (GaN/SOI). С точки зрения подавления *sidegating*- и *backgating*-эффектов технология GaN/SOI от IMEC является наиболее совершенной, так как она использует для создания межэлементной изоляции тонкий слой SiO₂, находящийся под отсеченным слоем Si, а также глубокие изолированные транчи, достигающие слоя SiO₂. Все это позволяет практически идеально изолировать элементы ИС друг на друга.

Интегральные схемы на основе гетероструктур GaN/SOI: результаты разработки

Авторами были разработаны силовые GaN-интегральные схемы, основанные на технологии GaN/SOI, в частности, это:

- высоковольтная ИС полумоста с драйвером управления и силовыми нормально закрытыми транзисторами с рабочим напряжением до 650 В;
- высоковольтный драйвер управления силовым полумостом, состоящим из пары силовых нормально закрытых GaN-транзисторов с рабочим напряжением до 650 В;
- высоковольтный одноканальный драйвер управления силовым нормально закрытым GaN-транзистором с рабочим напряжением до 650 В [24];
- низковольтная ИС полумоста с драйвером управления и силовыми нормально закрытыми транзисторами с рабочим напряжением до 200 В.

Проектирование всех ИС выполнялось в САПР Cadence Virtuoso при использовании средств физической верификации nmLVS, nmDRC от Calibre. С использованием дизайн-кита GANIC650SOI от IMEC (технологический процесс GaN650V) была разработана собственная библиотека высоковольтных сложных функциональных (СФ) блоков, на основе которой были спроектированы и реализованы топологии ИС с рабочим напряжением до 650 В.

Библиотека высоковольтных СФ-блоков включала в себя набор базовых логических элементов, построенных на основе резисторно-транзисторной логики: инвертор, 2И, 2ИЛИ, триггер Шмита, а также компаратор. С использованием базовых логических

элементов разработаны следующие СФ-блоки: блок логики, блоки защиты от перегрева (БЗП), блок защиты от низкого напряжения питания (БЗННП), блок управления временем защитного интервала (БУВЗИ), блок сдвига уровня сигнала (БСУС, level-shifter), драйверы нижнего и верхнего уровня сигнала.

С использованием данных СФ-блоков были построены три различные ИС. Типовая функциональная схема ИС полумоста, представленная на рис. 4, состоит из входной логической части, драйверов верхнего и нижнего уровней, а также силового полумоста. Входная часть задаёт режим работы ИС, обеспечивает отключение драйвера при перегреве или падении напряжения питания, задает защитный временной интервал, а также исключает ложные переключения

драйвера. Драйверы ИС преобразуют управляющие слаботочные сигналы в сильноточные сигналы, управляющие силовым полумостом. Силовой полумост состоит из пары высоковольтных силовых транзисторов, к которым подключается нагрузка.

Высоковольтная ИС полумоста обеспечивает выходной ток до 9 А, рабочее напряжение до 650 В и частоту переключений более 1 МГц. В табл. 2 приведены электрические характеристики высоковольтной ИС полумоста с драйвером управления, полученные в результате моделирования в САПР. Внешний вид топологии ИС полумоста приведен на рис. 5. Кристалл имеет 18 контактных площадок, расположенных по периметру кристалла. Размер ИС составляет 2,7×5,4 мм².

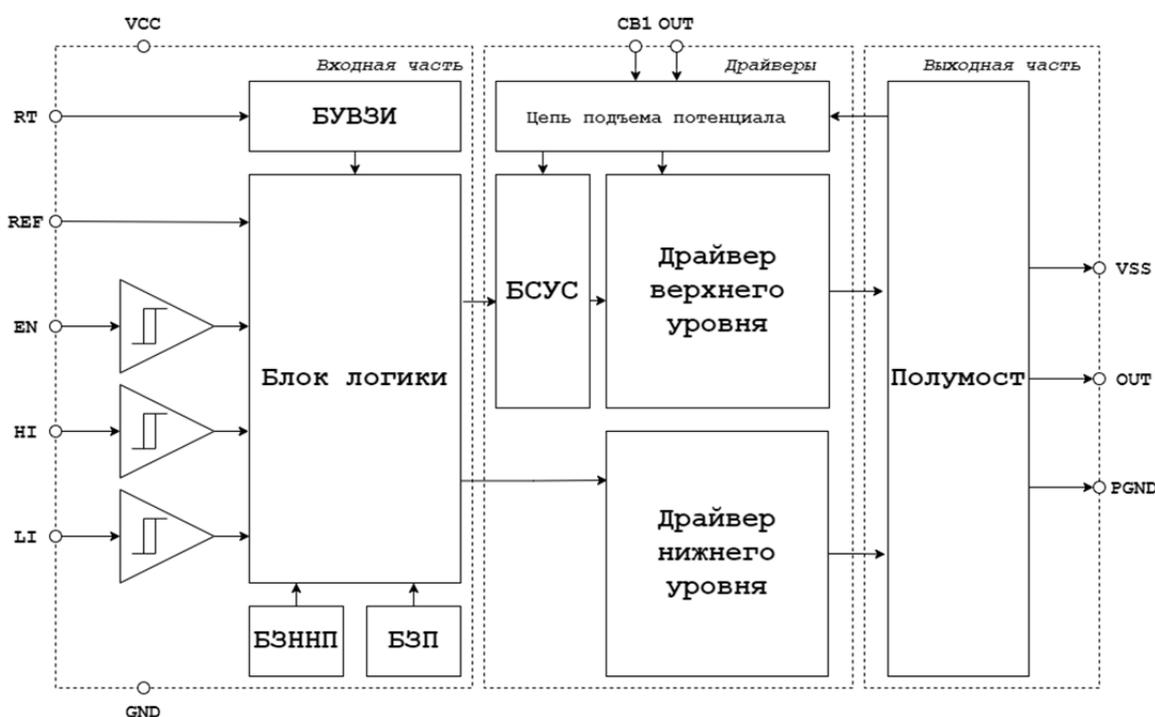


Рис. 4. Функциональная схема высоковольтного GaN ИС полумоста

Fig. 4. High-voltage half-bridge GaN IC functional block diagram

Таблица 2

Электрические характеристики высоковольтных GaN ИС

Характеристика	Полумост с драйвером управления	Драйвер управления полумостом	Одноканальный драйвер управления силовым транзистором
Напряжение питания логической части, В	5-7		
Выходной ток при $U_{\text{пит}} = 7 \text{ В}$, А	1,3-1,4	8-9	0,37
Время нарастания импульса*, нс	20-25	25-30	34
Время спада импульса*, нс	15-20	21-25	11
Время реакции на управляющее воздействие*, нс	40	43	45
Порог напряжения срабатывания БЗННП, В	4,2		
Максимальная рабочая температура, °С	135		

* При нагрузке $C = 1 \text{ нФ}$, $R = 1 \text{ Ом}$.

Высоковольтная ИС драйвера управления полумостом предназначена для управления двумя внешними нормально закрытыми GaN-транзисторами в составе силового модуля. Функциональная схема ИС драйвера полумоста имеет входную часть и драйверы верхнего и нижнего уровня, аналогично схеме, приведенной на рис. 4, но не имеет силового полумоста. ИС драйвера полумоста обеспечивает выходные токи 1,3–1,4 А и позволяет работать на частотах более 1 МГц, рабочее напряжение может достигать 650 В. В табл. 2 приведены электрические характеристики высоковольтной ИС драйвера управления полумостом, полученные в результате моделирования в САПР. Внешний вид топологии ИС драйвера управления полумостом приведен на рис. 5. Кри-

сталл имеет 17 контактных площадок, расположенных по периметру. Размер ИС составляет 2,7×5,4 мм².

Высоковольтная ИС одноканального драйвера предназначена для управления одним силовым нормально закрытым GaN транзистором в составе силового модуля. Функциональная схема ИС одноканального драйвера имеет упрощенную входную часть и драйвер нижнего уровня аналогично схеме, приведенной на рис. 4. В качестве нагрузки используется силовой GaN-транзистор с током до 10 А. Драйвер обеспечивает работу импульсного преобразователя на частотах до 1 МГц. Электрические характеристики ИС драйвера представлены в табл. 2. Кристалл одноканального драйвера имеет размеры 2,8×2,8 мм².

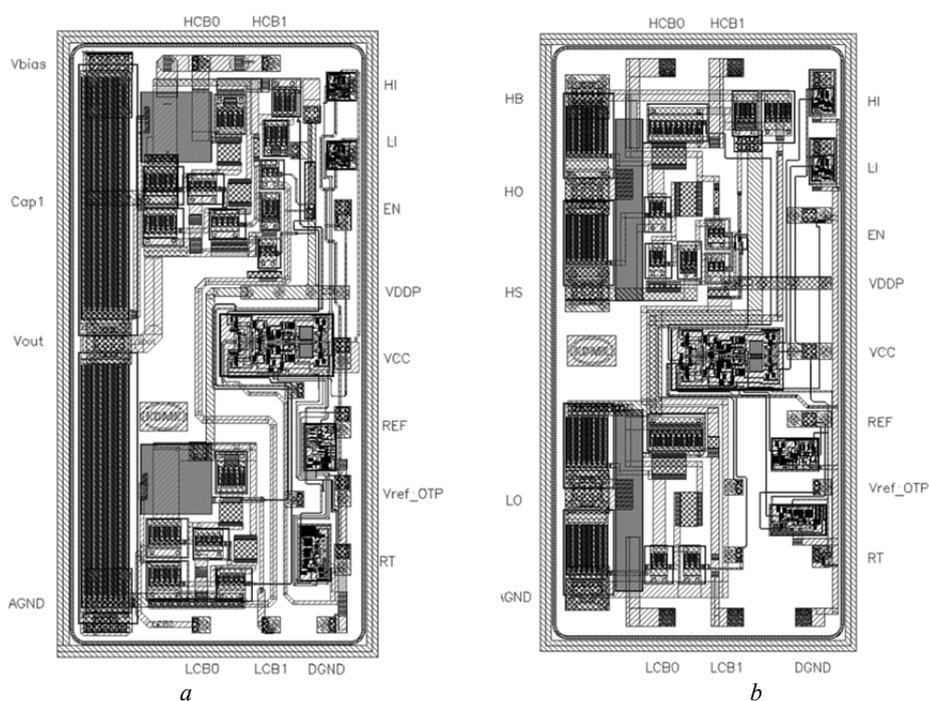


Рис. 5. Топологии: *a* – высоковольтной ИС полумоста; *b* – высоковольтной ИС драйвера управления полумостом

Fig. 5. Integrated circuit layouts: *a* – high-voltage half-bridge IC; *b* – high-voltage half-bridge driver IC

Разработанная библиотека высоковольтных СФ-блоков была адаптирована под низковольтное применение с использованием дизайн-кита GANIC200SOI (технологический процесс GaN200V). На основе библиотеки низковольтных СФ-блоков была спроектирована ИС низковольтного полумоста с драйвером и силовыми нормально закрытыми транзисторами. Функциональная схема низковольтного полумоста аналогична схеме, приведенной на рис. 4. Разработанная ИС полумоста обеспечивает выходной ток до 10 А, рабочее напряжение до 200 В, частоту коммутации до 1 МГц.

Внешний вид разработанной топологии ИС приведен на рис. 6. Выходные силовые транзисторы, образующие силовой полумост, располагаются в

верхней части кристалла. Для эффективного управления силовыми транзисторами, затворный драйвер располагается в непосредственной близости. Блоки логического управления располагаются между драйвером верхнего и нижнего уровня в нижней части интегральной схемы. Такое расположение позволяет уменьшить влияния силового полумоста на логическую часть ИС. Топология ИС имеет размеры 10×5 мм² и 12 контактных площадок, расположенных на расстоянии 1,2 мм друг от друга.

Для оценки КПД DC-DC преобразователя, выполненного на основе разработанной ИС полумоста, с рабочим напряжением до 200 В, была построена имитационная модель понижающего преобразователя.

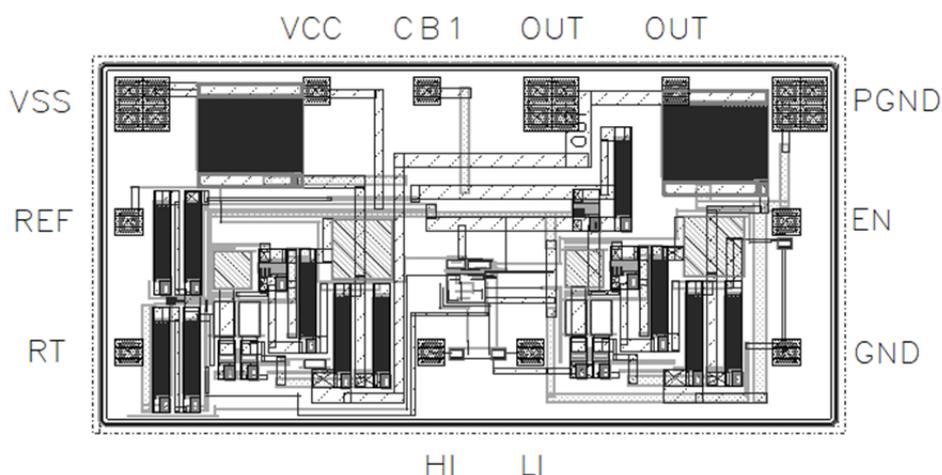


Рис. 6. Топология низковольтной ИС полумоста

Fig. 6. Low-voltage half-bridge IC layout

На разработанной модели сравнивались энергетические характеристики преобразователя с транзисторами на основе GaN (параметры получены при проектировании ИС) и Si (IRFB4020PBF [25]), аналогичные по напряжению и сопротивлению открытого канала. При входном напряжении 100 В, выходном напряжении 50 В, выходном токе 5 А и частоте переключения транзисторов 500 кГц были достигнуты показатели КПД преобразователя на основе Si около 93%, а преобразователя на основе GaN – около 96%. При увеличении частоты переключения транзисторов разрыв в КПД также будет увеличиваться. Таким образом, переход на GaN в первом приближении обеспечивает прирост КПД около 3%.

Заключение

Переход к силовой GaN-электронике является действенным методом, обеспечивающим рост энергоэффективности преобразователей электрической энергии.

Силовые GaN ИС позволяют достичь максимальных характеристик преобразователей энергии и ВИП, что делает их одними из наиболее перспективных элементов силовой GaN-микроэлектроники.

Применение гетероструктур GaN/SOI представляется одним из эффективных методов подавления *sidegating*- и *backgating*-эффектов и получения ИС с улучшенными характеристиками.

Список источников

1. *Newell R., Raimi D., Aldana G.* Global energy outlook 2019: the next generation of energy // *Resources for the Future*. 2019. V. 1. P. 8–19.
2. *Gielen D., Gorini R., Wagner N., Leme R., Gutierrez L., Prakash G. et. al.* Global energy transformation: a roadmap to 2050. 2019.
3. Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 № 261-ФЗ // *Собрание законодательства Российской Федерации*.
4. *Roccaforte F., Fiorenza P., Greco G., Nigro R.L., Giannazzo F., Patti A. et. al.* Challenges for energy efficient wide band gap semiconductor power devices // *Physica status solidi*. 2014. V. 211(9). P. 2063–2071. DOI: 10.1002/pssa.201300558
5. *Flack T.J., Pushpakaran B.N., Bayne S.B.* GaN technology for power electronic applications: a review // *Journal of Electronic Materials*. 2016. V. 45 (6). P. 2673–2682. DOI: 10.1007/s11664-016-4435-3
6. *Reusch D., Strydom J., Glaser J.* Improving high frequency DC-DC converter performance with monolithic half bridge GaN ICs // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). 2015. P. 381–387. DOI: 10.1109/ECCE.2015.7309713
7. *Wu Y.F., Gritters J., Shen L., Smith R.P., Swenson B.* kV-Class GaN-on-Si HEMTs Enabling 99% Efficiency Converter at 800 V and 100 kHz // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013. V. 29(6). P. 2634–2637. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2284248
8. *Baliga B.J.* Power semiconductor device figure of merit for high-frequency applications // *IEEE Electron Device Letters*. 1989. V. 10 (10). P. 455–457. DOI: 10.1109/55.43098
9. *Bi W., Kuo H.C., Ku P.C., Shen B.* Handbook of GaN semiconductor materials and devices. CRC Press, 2017. 709 p.
10. GaNPower Demonstrates Industry's First 1200 V Single-Die E-Mode GaN Power Devices // *GaNPower International*. URL: <https://iganpower.com/ganpower-demonstrates-industrys-first-1200-v-single-die-e-mode-gan-power-devices> (дата обращения: 14.11.2022).
11. GS-065-150-1-D2 650V Enhancement Mode GaN Transistor // *GaN Systems*. URL: <https://gansystems.com/gan-transistors/gs-065-150-1-d2/> (дата обращения: 14.11.2022).
12. Wide bandgap devices & modules for efficient power electronics // *Ferdinand-Braun-Institut*. URL: https://www.fbh-berlin.de/fileadmin/downloads/frequent_2020_online_PowerElectronics.pdf (дата обращения: 14.11.2022).

13. Hilt O., Bahat Treidel E., Wolf M., Kuring C., Tetzner K., Yazdani H. et al. Lateral and vertical power transistors in GaN and Ga₂O₃ // *IET Power Electronics*. 2019. V. 12(15). P. 3919–3927. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.0059
14. Soleimanzadeh R., Naamoun M., Khadar R.A., Erp R., Matioli E. H-terminated polycrystalline diamond p-channel transistors on GaN-on-silicon // *IEEE Electron Device Letters*. 2020. V. 41(1). P. 119–122. DOI: 10.1109/LED.2019.2953245
15. Zheng Z., Zhang L., Song W., Chen T., Feng S., Hon Ng Y. et al. Threshold voltage instability of enhancement-mode GaN buried p-channel MOSFETs // *IEEE Electron Device Letters*. 2021. V. 42(11). P. 1584–1587. DOI: 10.1109/LED.2021.3114776
16. Chowdhury N. p-Channel gallium nitride transistor on Si substrate. Massachusetts Institute of Technology, 2018.
17. Chen H.Y., Kao Y.Y., Zhang Z.Q., Liao C.H., Yang H.Y., Hsu M.S. et al. A fully integrated GaN-on-silicon gate driver and GaN switch with temperature-compensated fast turn-on technique for improving reliability // 2021 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). 2021. V. 64. P. 460–462. DOI: 10.1109/ISSCC42613.2021.9365828
18. Tang G., Kwan M.H., Zhang Z., He J., Lei J., Su R.Y. et al. High-speed, high-reliability GaN power device with integrated gate driver // 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD). 2018. P. 76–79. DOI: 10.1109/ISPSD.2018.8393606
19. MASTERGAN1 Datasheet, Rev.3, STMicroelectronics N.V., Plan-les-Ouates. Geneva, Switzerland, 2020. 27 p.
20. Li X. Reliability and Integration of GaN Power Devices and Circuits on GaN-on-SOI. Ku Leuven, 2020.
21. EPC2152 80 V, 15 A ePower™ Stage Preliminary Datasheet, Rev. 2.0, Efficient Power Conversion Corporation. El Segundo, CA, USA, 2021. 16 p.
22. LMG5200 80-V, 10-A GaN Half-Bridge Power Stage 07.09.2022. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmg5200.pdf>
23. MDC901 High Performance, 200 V Gate Driver IC // ASIC Products Mindcet URL: <https://www.mindcet.com/asic-products> (дата обращения: 14.11.2022).
24. Польницев Е.С., Проказина И.Ю., Бартенева А.И. Одноканальный GaN затворный драйвер управления силовым нормально закрытым n-GaN-транзистором // Девятнадцатая Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов: г. Томск, 4–7 мая 2022 г. STT Publishing, 2022. С. 75.
25. IRFB4020PBF, Digital Audio MOSFET 03.03.06 URL: <https://www.infineon.com/dgdl/irfb4020pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015356158ffd1e05>

References

1. Newell, R., Raimi, D. & Aldana, G. (2019) Global energy outlook 2019: the next generation of energy. *Resources for the Future*. 1. pp. 8–19.
2. Gielen, D., Gorini, R., Wagner, N., Leme, R., Gutierrez, L., Prakash, G., et. al. (2019) Global energy transformation: a roadmap to 2050.
3. Federal'nyj zakon "Ob energosberezhenii i o povyshenii energeticheskoy effektivnosti i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii" [Federal Law "On Energy Saving and Improving Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation"] dated 23.11.2009 № N 261-FZ. In: *Sobranie zakonodatel'stva Rossijskoj Federacii* [Collection of Legislation of the Russian Federation].
4. Roccaforte, F., Fiorenza, P., Greco, G., Nigro, R.L., Giannazzo, F., Patti, A. & Saggio, M. (2014) Challenges for energy efficient wide band gap semiconductor power devices. *Physica status solidi*. 211(9). pp. 2063–2071. DOI: 10.1002/pssa.201300558
5. Flack, T.J., Pushpakaran, B.N. & Bayne, S.B. (2016) GaN technology for power electronic applications: a review. *Journal of Electronic Materials*. 45(6). pp. 2673–2682. DOI: 10.1007/s11664-016-4435-3
6. Reusch, D., Strydom, J. & Glaser, J. (2015) Improving high frequency DC-DC converter performance with monolithic half bridge GaN ICs. *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. pp. 381–387. DOI: 10.1109/ECCE.2015.7309713
7. Wu, Y.F., Gritters, J., Shen, L., Smith, R.P. & Swenson, B. (2013) kV-Class GaN-on-Si HEMTs Enabling 99% Efficiency Converter at 800 V and 100 kHz. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 29(6). pp. 2634–2637. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2284248
8. Baliga, B.J. (1989) Power semiconductor device figure of merit for high-frequency applications. *IEEE Electron Device Letters*. 10(10). pp. 455–457. DOI: 10.1109/55.43098
9. Bi, W., Kuo, H.C., Ku, P.C. & Shen, B. (2017) *Handbook of GaN semiconductor materials and devices*. CRC Press.
10. GaNPower International. (2021) *GaNPower Demonstrates Industry's First 1200 V Single-Die E-Mode GaN Power Devices*. [Online] Available from: <https://iganpower.com/ganpower-demonstrates-industrys-first-1200-v-single-die-e-mode-gan-power-devices> (Accessed: 14.11.2022).
11. GaN Systems. (n.d.) *GS-065-150-1-D2 650V Enhancement Mode GaN Transistor*. [Online] Available from: <https://gansystems.com/gan-transistors/gs-065-150-1-d2/> (Accessed: 14.11.2022).
12. Ferdinand-Braun-Institut. (2020) *Wide bandgap devices & modules for efficient power electronics*. [Online] Available from: https://www.fbh-berlin.de/fileadmin/downloads/frequent_2020_online_PowerElectronics.pdf (Accessed: 14.11.2022).
13. Hilt, O., Bahat Treidel, E., Wolf, M., Kuring, C., Tetzner, K., Yazdani, H., et. al. (2019) Lateral and vertical power transistors in GaN and Ga₂O₃. *IET Power Electronics*. 12(15). pp. 3919–3927. DOI: 10.1049/iet-pel.2019.0059
14. Soleimanzadeh, R., Naamoun, M., Khadar, R.A., Erp, R. & Matioli, E. (2020) H-terminated polycrystalline diamond p-channel transistors on GaN-on-silicon. *IEEE Electron Device Letters*. 41(1). pp. 119–122. DOI: 10.1109/LED.2019.2953245
15. Zheng, Z., Zhang, L., Song, W., Chen, T., Feng, S., Hon, Ng Y., et. al. (2021) Threshold voltage instability of enhancement-mode GaN buried p-channel MOSFETs. *IEEE Electron Device Letters*. 42(11). pp. 1584–1587. DOI: 10.1109/LED.2021.3114776
16. Chowdhury, N. (2018) *p-Channel gallium nitride transistor on Si substrate: PHD thesis*. Massachusetts Institute of Technology.
17. Chen, H.Y., Kao, Y.Y., Zhang, Z.Q., Liao, C.H., Yang, H.Y., Hsu, M.S., et. al. (2021) 33.1 A fully integrated GaN-on-silicon gate driver and GaN switch with temperature-compensated fast turn-on technique for improving reliability. *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*. 64. pp. 460–462.
18. Tang, G., Kwan, M.H., Zhang, Z., He, J., Lei, J., Su, R.Y., et. al. (2018) High-speed, high-reliability GaN power device with integrated gate driver. *2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*. pp. 76–79.
19. MASTERGAN1 Datasheet, Rev.3, STMicroelectronics N.V., Plan-les-Ouates (2020). Geneva, Switzerland. pp. 1–27.

20. Li, X. (2020) *Reliability and Integration of GaN Power Devices and Circuits on GaN-on-SOI: PHD thesis*. Ku Leuven.
21. (2021) *EPC2152 80 V, 15 A ePower™ Stage Preliminary Datasheet, Rev. 2.0, Efficient Power Conversion Corporation*. El Segundo, CA, USA. pp. 1–16.
22. (2022) *LMG5200 80-V, 10-A GaN Half-Bridge Power Stage*. [Online] Available from: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmg5200.pdf>
23. ASIC Products Mindcet. (n.d.) *MDC901 High Performance, 200 V Gate Driver IC*. [Online] Available from: <https://www.mindcet.com/asic-products> (Accessed: 14.11.2022).
24. Polyntsev, E.S., Prokazina, I.Y. & Bartenev, A.I. (2022) Odnokanal'nyj GaN zatvornyj drajver upravleniya silovym normal'no-zakryтым n-GaN tranzistorom [Single channel GaN-based e-mode n-GaN HEMT gate driver]. In: *Devyatnadcataya Vserossijskaya konferenciya studentcheskih nauchno-issledovatel'skih inkubatorov* [Nineteenth All-Russian Conference of Student Research Incubators]. STT Publishing. pp. 75.
25. Infineon. (2006) *IRFB4020PBF, Digital Audio MOSFET*. [Online] Available from: <https://www.infineon.com/dgdl/irfb4020pbf.pdf?fileId=5546d462533600a4015356158ffd1e05>

Информация об авторах:

Бартенев Александр Иванович – аспирант Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия). E-mail: san4ubas1@gmail.com

Кагадей Валерий Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник НОЦ «Инжиниринговый центр СВЧ-техники и технологии» Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: vak@mail.tsu.ru

Коряковцев Артём Сергеевич – аспирант, младший научный сотрудник НИИ микроэлектронных систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия). E-mail: artem.s.koriakovtsev@tusur.ru

Полынтsev Егор Сергеевич – аспирант, лаборант НОЦ «Инжиниринговый центр СВЧ техники и технологии» Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: e.polyntsev@gmail.com

Помазанов Алексей Владимирович – аспирант, младший научный сотрудник НИИ «Микроэлектронных систем» Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия). E-mail: aleksei.v.pomazanov@tusur.ru

Проказина Ирина Юрьевна – аспирант, лаборант НОЦ «Инжиниринговый центр СВЧ техники и технологии» Национального исследовательского Томского государственного университета (Томск, Россия). E-mail: irina_tusur@mail.ru

Шейрман Фёдор Иванович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории СВЧ-микроэлектроники НИИ микроэлектронных систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Томск, Россия). E-mail: fish@tusur.ru

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Bartenev Aleksandr I., PhD student, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russian Federation). E-mail: san4ubas1@gmail.com.

Kagadey Valery A., Dr.Sc. (Physics and Mathematics), professor, senior researcher, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: vak@mail.tsu.ru.

Koryakovtsev Artyom S., PhD student, junior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russian Federation). E-mail: artem.s.koriakovtsev@tusur.ru

Polyntsev Egor S., PhD student, laboratory assistant, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: e.polyntsev@gmail.com.

Pomazanov Aleksei V., PhD student, junior researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russian Federation). E-mail: aleksei.v.pomazanov@tusur.ru.

Prokazina Irina Y., PhD student, laboratory assistant, National Research Tomsk State University (Tomsk, Russian Federation). E-mail: irina_tusur@mail.ru.

Sheyerman Feodor I., Cand.Sc. (Physics and Mathematics), leading researcher, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Tomsk, Russian Federation). E-mail: fish@tusur.ru.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 30.11.2022; одобрена после рецензирования 16.12.2022; принята к публикации 23.01.2023

The article was submitted 30.11.2022; approved after reviewing 16.12.2022; accepted for publication 23.01.2023

Научный журнал

ТЕХНОЛОГИИ БЕЗОПАСНОСТИ ЖИЗНЕДЕЯТЕЛЬНОСТИ

LIFE SAFETY / SECURITY TECHNOLOGIES

2023. № 1

Редактор В.Г. Лихачёва
Оригинал-макет А.И. Лелоюр
Редактор-переводчик Н.А. Глущенко
Дизайн обложки А.А. Аббасова

Подписано к печати 23.01.2023 г. Формат 60x84¹/₈.
Гарнитура Times. Печ. л. 12,7; усл. печ. л. 11,8.
Тираж 50 экз. Заказ № 5331. Цена свободная.

Дата выхода в свет 08.02.2023 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, Ленина, 36
Тел. 8(382-2)–52-98-49; 8(382-2)–52-96-75
Сайт: <http://publish.tsu.ru>; E-mail: rio.tsu@mail.ru