ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ДС.ТПУ.01, СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АВТОНОМНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

Решение диссертационного совета ДС.ТПУ.01 от 20.01.2022 г. № 2

О присуждении гражданину Российской Федерации Губареву Федору Александровичу ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Методы и аппаратура для визуализации и контроля поверхности горения высокоэнергетических материалов на основе нанопорошков металлов в режиме реального времени» по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики принята к защите 07 октября 2021 г. (протокол заседания №1) диссертационным советом ДС.ТПУ.01, созданным на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» Минобрнауки России по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 43, ауд. 121, приказ о создании диссертационного совета № 15895 от 06.12.2018, приказ № 109-16/об от 19.04.2020 о внесении изменений в приказ № 15895 от 06.12.2018.

В период подготовки диссертации соискатель **Губарев Федор Александрович** работал в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальном исследовательском Томском политехническом университете» в Исследовательской школе химических и биомедицинских технологий в должности доцента. В период с 2003 по 2016 годы Губарев Ф.А. являлся научным сотрудником лаборатории квантовой электроники Федерального

государственного бюджетного учреждения науки Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

В 2003 г. соискатель окончил Томский политехнический университет по направлению «Электроника и микроэлектроника» и получил квалификацию «Магистр техники и технологии».

В 2008 г. защитил кандидатскую диссертацию (физико-математические науки) на тему «Лазер на парах металлов с накачкой емкостным разрядом» в диссертационном совете Д 003.029.01 в Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН по специальности 01.04.05 – оптика.

Дополнительно введённый член диссертационного совета ДС.ТПУ.01:

- доктор физико-математических наук, профессор Стрижак Павел Александрович, профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Томского политехнического университета, г. Томск;

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, доцент Дзидзигури Элла Леонтьевна, доцент кафедры функциональных наносистем и высокотемпературных материалов Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Москва;

- доктор физико-математических наук, доцент Кудряшова Ольга Борисовна, старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов Института проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск;

- доктор физико-математических наук Ломаев Михаил Иванович, ведущий научный сотрудник лаборатории оптических излучений Института сильноточной электроники СО РАН, г. Томск

дали положительные отзывы на диссертацию.

Выбор дополнительно введённого члена диссертационного совета и официальных оппонентов обосновывался их высоким авторитетом в научном сообществе и профессиональной компетенцией в области исследования физико-

химических свойств наноматериалов, в том числе высокоэнергетических материалов, их методов и средств исследования, лазерной физики, достижениями и наличием публикаций в области науки и практики за последние 5 лет в соответствии с установленными требованиями.

Соискатель имеет 82 опубликованные работы по теме диссертации, из них в рецензируемых научных изданиях – 59 работ. Общий объём публикаций по теме диссертации составляет 967 страниц с долей авторского участия соискателя 41 %. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах.

Наиболее значимые научные работы (из числа рецензируемых изданий) по теме диссертации за последние 5 лет:

1. Two-channel system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders / F.A. Gubarev, E.Yu. Burkin, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, L. Li // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2021. – Vol. 70. – Art. No 9371760.

2. In situ nanopowder combustion visualization using laser systems with brightness amplification / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, P.A. Antipov, D.V. Shiyanov, F.A. Gubarev // Proceedings of the Combustion Institute. – 2021. – Vol. 38. – P. 1695–1702.

3. Two-brightness-amplifier imaging system for energetic-materials-combustion study / F.A. Gubarev, A.S. Moldabekov, A.V. Mostovshchikov, L. Li // Review of Scientific Instruments. – 2021. – Vol. 92. – Art. No 053702.

4. Laser speckle correlation technique application for remote characterization of metal nanopowders combustion / L. Li, F.A. Gubarev, Y. Cao, I.D. Liushnevskaya, A.V. Mostovshchikov // Applied Optics. – 2021. – Vol. 60, No 22. – P. 6585–6592.

5. Spatial-temporal radiation distribution in a CuBr vapor brightness amplifier in a real laser monitor scheme / L. Li, D.V. Shiyanov, F.A. Gubarev // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2020. – Vol. 126, No 10. – Art no. 155.

6. Optical system with brightness amplification for monitoring the combustion of aluminum-based nanopowders / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, A. Smirnov,

F.A. Gubarev // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2020. – Vol. 69, No 2. – P. 457–468.

7. Imaging system with brightness amplification for a metal-nanopowder combustion study / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, P.A. Antipov, D.V. Shiyanov, F.A. Gubarev // Journal of Applied Physics. – 2020. – Vol. 127, Art. No 194503. – P. 194503-1–194503-11.

8. Analysis of surface changes of burning nanopowders using digital processing of laser monitor images / F.A. Gubarev, S. Kim, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin // Applied Optics. – 2020. – Vol. 59, No 18. – P. 5487–5496.

9. Laser speckle correlation technique application for study of aluminium nanopowder combustion / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, I.D. Sytnik, F.A. Gubarev // Applied Optics. – 2020. – Vol. 59, No 5. – P. 1263–1270.

10. Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor / L. Li, A.P. Ilyin, F.A. Gubarev, A.V. Mostovshchikov, M.S. Klenovskii // Ceramics International. – 2018. – Vol. 44, № 16. – P. 19800–19808.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1) отзыв на автореферат от доктора физико-математических наук, профессора, заслуженного изобретателя РФ, почетного работника ВО РФ Солдатова Анатолия Николаевича, профессора кафедры управления инновациями ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск (с вопросами);

2) отзыв на автореферат от доктора технических наук, профессора Дьяченко Александра Николаевича, заведующего кафедрой химии и технологии редких элементов ФГБОУ ВО «МИРЭА-Российский технологический университет», г. Москва (с замечанием);

3) отзыв на автореферат от доктора технических наук, профессора Швецова Игоря Васильевича, заведующего кафедрой энергетики и транспорта ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород (с замечанием);

4) отзыв на автореферат от доктора физико-математических наук, доцента, Ефимова Валерия Григорьевича, главного научного сотрудника лаборатории акустических и радиационных методов контроля АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск (с вопросами);

5) отзыв на автореферат от доктора химических наук, доцента Крайденко Романа Ивановича, директора департамента химических технологий ООО «Института легких материалов и технологий» ОК РУСАЛ (ООО «ИЛМиТ»), г. Москва (с вопросами);

6) отзыв на автореферат от доктора физико-математических наук, профессора Ражева Александра Михайловича, заведующего лабораторией импульсных газоразрядных лазеров ФГБУН Институт лазерной физики СО РАН, г. Новосибирск (с замечаниями);

7) отзыв на автореферат от кандидата технических наук Шувалова Геннадия Владимировича, директора Западно-Сибирского филиала Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», г. Новосибирск (с замечанием);

8) отзыв на автореферат от кандидата технических наук Гордеева Константина Георгиевича, главного конструктора по автономной энергетике и преобразовательной технике АО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск (с замечанием);

9) отзыв на автореферат от доктора технических наук, профессора Мещерякова Романа Валерьевича, главного научного сотрудника лаборатории 80 киберфизических систем Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва (с замечанием);

10) отзыв на автореферат от доктора технических наук, профессора Петрова Евгения Анатольевича, декана инженерного спецфакультета, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийский технологический институт (филиал), г. Бийск (с замечаниями).

11) отзыв на автореферат от доктора физико-математических наук Султанова Валерия Гулямовича, заведующего лабораторией вычислительной гидродинамики, ФГБУН Институт проблем химической физики Российской академии наук (ИПХФ РАН), г. Черноголовка (без замечаний).

Все поступившие отзывы являются положительными, замечания и вопросы, указанные в них, носят рекомендательный и дискуссионный характер, или являются уточняющими, и касаются границ применимости разработанного оборудования, срока службы тиратрона, радиального распределения усиления, терминологии, неточности оформления электрической схемы, параметров оптической схемы, точности определения границ фронта горения, величины отраженного от объекта излучения, мощности инициирующих лазеров.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана совокупность новых экспериментальных методик исследования поверхности горящих нанопорошков металлов на основе лазерных мониторов и аппаратура для их реализации, позволяющие визуально исследовать морфологические изменения поверхности высокоэнергетических материалов во время горения сквозь пламя и выявить качественно новые закономерности исследуемых процессов;

предложены 1) оригинальные суждения, направленные на расширение функциональных возможностей лазерных мониторов для визуализации горения высокоэнергетических материалов и методик качественной и количественной оценки процессов горения нанопорошков металлов по изменению свойств поверхности материала во время горения; 2) нетрадиционный подход к дистанционному мониторингу поверхности горящих материалов на основе метода лазерной спекл-корреляции и методика определения временных параметров процессов горения нанопорошков на основе этого метода;

доказаны 1) перспективность использования новых идей дистанционного мониторинга поверхности нанопорошков металлов во время горения на основе

метода лазерной спекл-корреляции; изучения процессов горения высокоэнергетических металлов, таких как нанопорошки металлов, термитные смеси, модельные топливные смеси, с использованием методов наблюдения на основе моностатического и бистатического лазерного монитора; 2) наличие закономерностей изменения поверхности нанопорошка алюминия на различных стадиях горения и зависимостей радиального распределения излучения в параллельном пучке усилителя яркости и в пучке, несущем изображение в лазерном мониторе, от температуры контейнеров с рабочим веществом и расстояния до объекта наблюдения;

введены новые понятия «двухканальный лазерный монитор», характеризующийся синхронизированной работой двух усилителей яркости и двух скоростных камер, и «лазерная спекл-корреляция», в которой основным информативным параметром является значение коэффициента корреляции, а не величина перемещения изображений, соответствующая максимальному коэффициенту корреляции.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказаны методики исследования горения высокоэнергетических материалов на основе микро- и нанопорошков металлов на основе методов лазерного мониторинга, лазерной спекл-корреляции, лазерной подсветки, скоростной видеорегистрации, вносящие вклад в расширение представлений о морфологических изменениях поверхности горения, позволяющие качественно и количественно оценивать временные параметры и устанавливать закономерности горения;

применительно к проблематике диссертации эффективно использован комплекс методов визуализации на основе прямой скоростной видеосъемки, тепловидения и визуализации с применением лазерной подсветки, а также комплекс экспериментальных методик исследования структуры и физико-химических свойств нанопорошков металлов.

изложены 1) доказательства достоверности использования значений средней яркости и коэффициента корреляции изображений лазерного монитора для

получения количественной информации о продолжительности стадий горения, количестве стадий, интервале между стадиями, динамике изменения поверхности; 2) условия выравнивания радиального распределения двухпроходового излучения усилителя яркости на парах бромида меди при распространении параллельного пучка и пучка, сформированного оптическими элементами лазерного монитора;

раскрыты существенные проявления теории: при горении нанопорошка алюминия в воздухе во время прохождения первой волны горения морфология поверхности практически не меняется, в то время как на второй стадии образуются агломерированные продукты сгорания алюминия;

изучены факторы, ограничивающие дальность наблюдения и мощность излучения лазерного монитора для исследования нанопорошков металлов;

проведена модернизация существующих численных методов обработки цифровых изображений, обеспечившая разработку методики дистанционного исследования горения нанопорошков металлов на основе метода лазерной спекл-корреляции и методик анализа средней яркости и коэффициента корреляции изображений поверхности высокоэнергетических материалов, полученных лазерным монитором.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены в научные исследования и учебный процесс лабораторные установки и методики на основе лазерных мониторов для исследования горения высокоэнергетических материалов, защищенные патентами Российской Федерации;

определены перспективы практического использования разработанных методик и оборудования на практике для исследования горения высокоэнергетических материалов и других высокотемпературных процессов с участием микро- и нанопорошков металлов и лазерного излучения;

создана система практических рекомендаций по применению усилителей яркости на парах бромида меди в системах лазерного мониторинга горения высокоэнергетических материалов;

представлены 1) предложения по дальнейшему совершенствованию систем визуализации поверхностей горения ВЭМ на основе лазерного мониторинга и лазерной спекл-корреляции; 2) методические рекомендации для построения синхронизованного источника накачки двух газоразрядных трубок в составе двухканального и бистатического лазерных мониторов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных работ результаты получены на сертифицированном оборудовании, показана воспроизводимость результатов исследования характеристик усилителей яркости в различных условиях, временные параметры процессов горения соответствуют существующим моделям горения нанопорошков металлов;

теория построена на известных фактах о распространении оптических излучений, законах геометрической оптики, теоретических сведениях о процессах горения высокоэнергетических материалов;

идея базируется на анализе практического использования активных элементов на парах бромида меди, опыте работы с усиливающими средами на парах металлов и высоковольтными схемами накачки, обобщении передового опыта в области скоростной визуализации быстропротекающих процессов и лазеров на самоограниченных переходах в парах металлов;

использованы сравнения авторских данных и данных, полученных ранее по тематике активных оптических систем с усилением яркости, практическому применению лазерных сред на парах металлов, визуализации процессов горения;

установлено качественное совпадение авторских результатов в области исследования горения нанопорошков металлов и их смесей с результатами, представленными в независимых источниках по тематике горения;

использованы современные методики сбора и обработки исходной информации на основе скоростной видеорегистрации, осциллографирования, прямого измерения физических величин, цифровой обработки изображений и табличных данных, представительные выборочные совокупности экспериментов с обоснованием подбора объектов наблюдения.

Личный вклад соискателя состоит в постановке задач, разработке методов и методик проведения исследований, разработке оптических схем экспериментов, электрических схем накачки, лабораторных макетов оптических систем скоростной визуализации высокотемпературного горения нанопорошков металлов, проведении экспериментальных исследований, обработке и анализе экспериментальных и расчетных данных, подготовке публикаций.

На заседании 20 января 2022 г. диссертационный совет принял решение присудить Губареву Федору Александровичу ученую степень доктора технических наук.

При проведении открытого голосования диссертационный совет в количестве 6 человек, из них 6 докторов наук по научной специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики, участвовавших в заседании, из 2-х человек, входящих в состав совета, и 4-х человек, дополнительно введенных в состав совета, проголосовали: за – 6, против – 0, воздержавшихся – 0.

Председательствующий на заседании
диссертационного совета ДС.ТПУ.01
д.ф.-м.н. Двилис Эдгар Сергеевич

Ученый секретарь диссертационного
совета ДС.ТПУ.01, д.т.н. Мостовщиков Андрей
Владимирович

20.01.2022 г.