

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке

Национального исследовательского  
Томского политехнического  
университета



М.С. Юсубов

« 2 » июля 2021 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Диссертация «Методы и аппаратура для визуализации и контроля поверхности горения высокоэнергетических материалов на основе нанопорошков металлов в режиме реального времени» выполнена в Исследовательской школе химических и биомедицинских технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета и лаборатории квантовой электроники Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН).

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 Томской 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.

Диссертационная работа рассмотрена на Ученом совете Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета.

**Присутствовали:**

1. Трусова М.Е., д.х.н., директор ИШХБМТ, председатель
2. Фефелова А.Г., эксперт ОО ИШХБМТ, секретарь
3. Ленерт Ю.А., зам. директора по развитию ИШХБМТ (онлайн)
4. Пестряков А.Н., д.х.н., профессор (онлайн)
5. Бразовский К.С., д.т.н., профессор (онлайн)
6. Сурменев Р.А., д.т.н., директор НИЦ ФМКМ ИШХБМТ (онлайн)
7. Родригес Контрерас Р.Д., PhD, профессор (онлайн)
8. Губарев Ф.А., к.ф.-м.н., доцент, **соискатель**
9. Скорик Г.В., к.ф.н., начальник орг. отдела ИШХБМТ (онлайн)
10. Евтушенко Г.С., д.т.н. (онлайн)
11. Тригуб М.В., к.т.н, ведущий научный сотрудник ИОА СО РАН
12. Солдатов А.И. д.т.н., профессор ИШНКБ
13. Лидер А.М., д.т.н., зав. отделением экспериментальной физики
14. Юдин Н.А. д.т.н., профессор ТГУ
15. Федоров А.И., д.ф.-м.н., старший научный сотрудник ИОА СО РАН
16. Медведев В.В., д.ф.-м.н., профессор ИШПР
17. Мостовщиков А.В. д.т.н., старший научный сотрудник ИЯТШ
18. Миронова И.А., аспирант ИШХБМТ

19. Антонкин Н.С., магистрант ИШХБМТ
20. Люшневская Ю.А., аспирант ИШХБМТ
21. Молдабеков А.С. , аспирант ИШХБМТ
22. Жуков Е.Л., аспирант ИШХБМТ
23. Слизевич Д.С., аспирант ИШХБМТ

**По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

Диссертационная работа является самостоятельно выполненной законченной научно-квалификационной работой.

1. **Актуальность темы исследования** связана с развитием направления высокоэнергетических материалов (ВЭМ) на основе микро- и нанопорошков металлов и возрастающей потребностью в разработке новых методов, методик и приборов для исследования динамики процессов горения в режиме реального времени, получением новых научных данных о закономерностях горения с целью получения высокоэнергетических материалов с заданными свойствами, а также повысить эффективность использования дисперсных металлов в различных технологических приложениях. В исследовании закономерностей горения и разработке способов улучшения свойств ВЭМ, методы на основе скоростной визуализации являются важным инструментом. Высокие температуры (свыше 2000 °С), достигаемые при горении ВЭМ на основе нанопорошков металлов, создают над поверхностью яркосветящееся пламя, препятствующее визуализации поверхности горения. В связи с этим, решение проблемы визуализации поверхности ВЭМ в режиме реального времени сквозь экранирующий слой пламени является важной научно-технической задачей.

**Цель работы:** разработка методик исследования высокотемпературного горения нанопорошков металлов и их смесей на основе методов скоростной видеосъемки с применением лазерного монитора и лазерной подсветки, а также практическая реализация разработанных методик.

**2. Соответствие работы Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации** (Указ Президента РФ от 01.12.2016 г. № 642):

– переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта.

**Соответствие работы приоритету развития науки и техники Российской Федерации** (Указ Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899):

- перспективные виды вооружения, военной и специальной техники;
- индустрия наносистем.

**Соответствие работы критическим технологиям** (Указ Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899):

- базовые и критические военные и промышленные технологии для создания перспективных видов вооружения, военной и специальной техники;
- технологии получения и обработки конструкционных наноматериалов;
- технологии получения и обработки функциональных наноматериалов;
- технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику.

Значительная часть диссертации выполнена в рамках Государственного задания «Наука», проект № 11.1928.2017/ПЧ «Технология модифицирования микро- и нанопорошков металлов высокоэнергетичным СВЧ-излучением с импульсами наносекундной длительности».

**3. Полнота изложения материалов диссертации.** По результатам выполненных исследований опубликованы **82** печатных работы, в том числе **32** статьи в журналах, индексируемых Scopus или Web of Science, **18** статей в рецензируемых российских журналах из списка ВАК, **19** статей в сборниках трудов конференций, **9** патентов РФ, **2** свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ, **2** монографии.

Основное содержание результатов диссертационной работы и её результаты отражены в работах:

**В изданиях, индексируемых в международных базах данных  
Scopus или Web of Science**

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 20 (Early Posting).
5. Laser monitor for studying the combustion of thin layers of metal nanopowders / **F.A. Gubarev**, A.V. Mostovshchikov, A.I. Fedorov, L. Li // Progress in Electromagnetics Research M. – 2021. – Vol. 101. – P. 37–45.
6. An optical system with brightness amplification for studying the surface of metal nanopowders during combustion / **F.A. Gubarev**, S. Kim, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Il'in // Instruments and Experimental Techniques. – 2020. – Vol. 63, No. 3. – P. 379–386.
7. 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.

8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. Laser systems for distant monitoring of nanopowder combustion / L. Li, P.A. Antipov, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, **F.A. Gubarev** // Progress in Electromagnetics Research M. – 2019. – Vol. 84. – P. 85–93.
13. 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.
14. High-speed visualization of nanopowder combustion in air / **F.A. Gubarev**, M.S. Klenovskii, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin // Optica Pura y Aplicada. – 2018. – Vol. 51, № 4. – P. 1–7.
15. Monitoring of aluminum nanopowder combustion ignited by laser radiation / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Il'in, **F.A. Gubarev** // Progress in Electromagnetics Research Letters. – 2018. – Vol. 75. – P. 125–130.
16. Influence of peaking capacitance on the output power of capacitive-discharge-pumped metal halide vapor lasers / D.V. Shiyanov, V.B. Sukhanov,

**F.A. Gubarev** // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 2018. – Vol. 54, No 2. – Art. No 1500107.

17. Spatial-temporal gain distribution of a CuBr vapor brightness amplifier / **F.A. Gubarev**, L. Li, M.S. Klenovskii, D.V. Shiyanov // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2016. – Vol. 123, № 11. – Art no. 284.
18. Radial distribution of radiation in a CuBr vapor brightness amplifier used in laser monitors / **F.A. Gubarev**, M.V. Trigub, M.S. Klenovskii, L. Li, G.S. Evtushenko // Applied Physics B: Lasers and Optics. – 2016. – Vol. 122, № 1. – Art no. 2.

#### **В российских изданиях из перечня ВАК РФ**

19. Лазерный монитор с независимой подсветкой для наблюдения процессов высокотемпературного горения нанопорошков металлов / **Ф.А. Губарев**, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин, Л. Ли, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // Письма в журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – Вып. 8. – С. 20–24.
20. Двухканальный лазерный монитор для наблюдения процессов высокотемпературного горения нанопорошков металлов / **Ф.А. Губарев**, А.В. Мостовщиков, А.П. Ильин, Л. Ли, А.И. Федоров, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // Письма в журнал технической физики. – 2021. – Т. 47. – Вып. 7. – С. 38–41.
21. Губарев Ф.А. Радиальное распределение однопроходowego излучения в активном элементе лазерного монитора / **Ф.А. Губарев**, Г.С. Евтушенко, Ли Линь // Контроль. Диагностика. – 2014. – №. 13. – С. 160–162.

#### **Публикации в сборниках трудов конференций**

22. Laser monitor application for study of aluminum nanopowder ignition and combustion / **F.A. Gubarev**, I.D. Liushnevskaya, L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin // Proceedings of SPIE. – 2021. – Vol. 11846. – Art. No 1184604.
23. Study of aluminium nanopowder combustion by method of laser-speckle correlation / L. Li, A. Mostovshchikov, A. Ilyin, **F. Gubarev** // IOP Conference

- Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1019. – Art. No 012061.
24. High-speed visualization of aluminum nanopowder combustion in air / **F. Gubarev**, A. Mostovshchikov, A. Ilyin, L. Li // Proceedings of SPIE. – 2019. – Vol. 11066. – Art. No 1106610.
  25. Antipov P.A. Rotational projection optical system for nanopowder combustion monitoring / P.A. Antipov, L. Li, **F.A. Gubarev** // 20th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Novosibirsk, 2019. – P. 373–378.
  26. Monitoring of nanopowder combustion ignited by laser radiation / L. Li, A.V. Mostovshchikov, A.P. Ilyin, A. Smirnov, **F.A. Gubarev** // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Toyama, 2018. – P. 311–316.
  27. Aluminum nanopowder combustion monitoring using an optical system with brightness amplification / **F.A. Gubarev**, A.V. Mostovshchikov, A.P. Il'in, L. Li // 2017 Progress in electromagnetics research symposium – spring (PIERS). – St Petersburg, 2017. – P. 2694–2698.
  28. **Gubarev F.A.** Copper bromide laser monitor for combustion processes visualization / **F.A. Gubarev**, A.V. Mostovshchikov, M.S. Klenovskii // Progress in Electromagnetics Research Symposium (PIERS). – Shanghai, 2016. – P. 2666–2670.
  29. **Gubarev F.A.** A mirror based scheme of a laser projection microscope / **F.A. Gubarev**, L. Li, M.S. Klenovskii // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – Vol. 81. – Art. No. 012016.
  30. Speckle pattern processing by digital image correlation / **F. Gubarev**, L. Li, M. Klenovskii, A. Glotov // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 48. – Art. No 04003.
  31. Li L. The influence of the radiation source parameters on the accuracy of digital speckle correlation method / L. Li, **F. Gubarev** // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 79. – Art. No 01053.

32. Vibration measurement by means of digital speckle correlation / L. Li, **F.A. Gubarev**, M.S. Klenovskii, A.I. Bloshkina // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). – Omsk, 2016. – Art. No 7491753.
33. Investigation of extracting information from vibrating objects by digital speckle correlation / A.I. Bloshkina, L. Li, **F.A. Gubarev**, M.S. Klenovskii // XVII International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Novosibirsk, 2016. – P. 637–641.
34. **Gubarev F.A.** Radial distribution of a single-pass amplified radiation in the active elements of CuBr lasers / **F.A. Gubarev**, M.S. Klenovskii, L. Li // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 81, № 1. – P. 1–8.
35. Сухарников К.В. Бистатическая схема лазерного монитора / К.В. Сухарников, **Ф.А. Губарев** // Сборник научных трудов III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Электронные приборы, системы и технологии». – Томск, 2013. – С. 200–206.

#### Патенты и свидетельства

36. Пат. 2685072 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Способ исследования процесса горения порошков металлов или их смесей / **Губарев Ф.А.**, Ли Л., Мостовщиков А.В., Ильин А.П.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – №2018124660; заявил. 06.07.18; опубл. 16.04.19, Бюл. № 11. – 11 с.
37. Пат. 2746308 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей / **Губарев Ф.А.**, Мостовщиков А.В., Буркин Е.Ю., Свиридов В.В., Ильин А.П.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – №2020133002; заявил. 07.10.20; опубл. 12.04.2021; Бюл. №11. – 15 с.

38. Пат. 2712756 Российская Федерация, МПК G 02 B21/0004. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей / Губарев Ф.А., Ли Л., Антипов П.А., Мостовщиков А.В., Ильин А.П.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – №2019117585; заявил. 06.06.19; опубл. 31.01.2020; Бюл. № 4. – 14 с.
39. Пат. 2685040 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей / Губарев Ф.А., Ли Л., Мостовщиков А.В., Ильин А.П.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – №2018124662; заявил. 06.07.18; опубл. 16.04.19, Бюл. № 11. – 11 с.
40. Пат. 2687308 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Устройство для исследования процесса горения порошков металлов или их смесей / Губарев Ф.А., Ли Л., Мостовщиков А.В., Ильин А.П.; заявитель и патентообладатель Томский политехнический университет. – №2018124663; заявил. 06.07.18; опубл. 13.05.19, Бюл. № 14. – 10 с.
41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021618999 Российская Федерация, Программа расчета коэффициента корреляции спекл-изображений / Люшневская Ю.Д., Губарев Ф.А. – №2021618120; заявил. 28.05.21; опубл. 03.06.21.
42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018610433 Российская Федерация, Оценка времени свертывания крови методом анализа цифровых спекл-изображений / Ли Л., Губарев Ф.А. – №2017661573; заявил. 13.11.17; опубл. 11.01.18.
43. Пат. на полезную модель 126852 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Лазерный проекционный микроскоп / Тригуб М.В., Евтушенко Г.С., Губарев Ф.А., Торгаев С.Н.; Томский политехнический университет. – № 2012145585/28; заявил. 25.10.12; опубл. 10.04.13, Бюл. № 10. – 2 с.
44. Пат. 2463634 Российская Федерация, МПК G 02 B21/00. Лазерный проекционный микроскоп (варианты) / Тригуб М.В., Евтушенко Г.С.,

Губарев Ф.А., Торгаев С.Н.; Томский политехнический университет. – №2011120852/28; заявл. 24.05.11 опубл. 10.10.2012, Бюл. №28. – 9 с.

45. Пат. 2363080 Российская Федерация, МПК Н 01 S3/08. Способ возбуждения лазеров на парах галогенидов металлов и активный элемент лазера на парах галогенидов металлов / Суханов В.Б., Троицкий В.О., Губарев Ф.А., Фёдоров В.Ф.; ИОА СО РАН. – № 2007137328/28; заявл. 08.10.07; опубл. 27.07.09, Бюл. № 21. – 12 с.

46. Пат. на полезную модель 62742 Российская Федерация, МПК Н 01 S3/08. Активный элемент лазера на парах галогенида металла / Суханов В.Б., Троицкий В.О., Губарев Ф.А., Иванов А.И.; ИОА СО РАН. – №2005130448/28; заявл. 30.09.05; опубл. 27.04.07, Бюл. № 12. – 2 с.

Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научных семинарах Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

Результаты работы представлены на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: XV Всероссийский симпозиум по горению и взрыву (г. Москва, 2020 г.), 38th International Symposium on Combustion (Adelaide, Australia, 2021 г.), The Annual Conference «Saratov Fall Meeting» (г. Саратов, 2018, 2020 гг.), VIII Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы» (г. Красноярск, 2019 г.), Международная конференция по импульсным лазерам и применениям лазеров – AMPL (г. Томск, 2007–2019 гг.), 29-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии (КрыМиКо'2019, г. Севастополь, 2019 г.), International Conference of Young Specialists on

Micro/Nanotechnologies and Electron Devices – EDM (ЗСОЛ НГТУ «Эрлагол», п. Чемал, 2019 г.), 14th International Forum on Strategic Technology (IFOST 2019, г. Томск, 2019 г.), VХ Международная выставка и научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2019» (г. Новосибирск, 2019 г.), Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) in Shanghai (Китай, 2016 г.), St. Petersburg (Россия, 2017 г.), Toyama (Япония, 2018 г.), NDE 2017 Conference & Exhibition of the society for NDT (Chennai, India, 2017 г.), Международная научно-практическая конференция «Информационно-измерительная техника и технологии» (г. Томск, 2016 г.), Международная конференция по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (п. Катунь, 2011, 2015 гг.), Симпозиум “Лазеры на парах металлов” (г. Лоо, 2006–2012 гг.).

Разработанное в ходе выполнения диссертационной работы лабораторное оборудование и методики внедрены в научно-исследовательской лаборатории СВЧ-технологии Инженерной школы ядерных Томского политехнического университета, использованы при проведении совместных исследований с НИИ Прикладной математики и механики Томского государственного университета, используются в учебном процессе при подготовке магистрантов и аспирантов ТПУ.

**4. Личный вклад соискателя заключается в построении оптических схем экспериментов, проведении экспериментальных исследований, разработке методики проведения исследований и обработке цифровых изображений, разработке прототипа прибора для измерения времени свертывания крови, обработке полученных экспериментальных данных, построении графиков и зависимостей, подготовке публикаций.**

На основном этапе работ по диссертации в 2014–2021 гг. под руководством автора диссертации или при его непосредственном участии были разработаны оптические схемы экспериментов, электрические схемы накачки, лабораторные макеты оптических систем скоростной визуализации высокотемпературного горения нанопорошков металлов, проведены экспериментальные исследования, обработаны экспериментальные и

расчетные данные, подготовлены публикации.

На начальном этапе работ по диссертации в 2006-2014 гг. постановка задач исследования осуществлялась совместно с заведующим кафедрой промышленной и медицинской электроники ТПУ Г.С. Евтушенко и заведующим лабораторией квантовой электроники ИОА СО РАН В.О. Троицким.

## **5. Научная новизна**

1. Впервые продемонстрирована возможность визуализации процессов инициирования и горения нанопорошков металлов, термитных смесей и модельной топливной смеси в воздухе сквозь яркосветящееся пламя с использованием лазерного монитора на парах бромида меди. Показана возможность изучения морфологии поверхности горящих образцов нанопорошков металлов в режиме реального времени с использованием лазерного монитора с временным разрешением до 0,8 мс.

2. С использованием лазерного монитора показано, что 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.

3. Реализованы режимы работы усилителей яркости с малой мощностью сверхизлучения, необходимой для исследования легковоспламеняющихся высокоэнергетических материалов, в трубках относительно большого диаметра (1,5–3 см) с использованием газоразрядных трубок на парах бромида меди с независимым контролем температурных параметров.

4. Установлено, что изменение отражательной способности поверхности нанопорошка металла приводит к изменению яркости изображений лазерного монитора в диапазоне до 37% от среднего значения и дает возможность количественной оценки временных параметров процессов горения в режиме реального времени.

5. Показано, что высокое пространственное разрешение при визуализации лазерного инициирования тонких слоев нанопорошков

металлов обеспечивается фокусировкой луча иницирующего лазера и пучка излучения лазерного монитора одним и тем же объективом.

6. Экспериментально показано, что кольцевой профиль параллельного пучка усилителя яркости значительно выравнивается при распространении пучка излучения лазерного монитора, несущего изображение, за счет формирующих оптических элементов при одинаковых условиях работы усилителя яркости.

7. Разработана экспериментальная методика для определения количества и продолжительности стадий горения, а также скорости горения нанопорошков металлов на основе метода лазерной спекл-корреляции.

## **6. Теоретическая значимость**

1. Показано, что температура металла, нагретого до 3000 К, не влияет на изображения лазерного монитора на основе активной среды на переходах атома меди, при этом расчетная энергия засветки, соответствующая данной температуре, в 104–105 раз меньше собственных шумов усилителя яркости.

2. Показана возможность использования усредненной яркости пикселей и коэффициента корреляции изображений лазерного монитора для получения количественной информации о продолжительности стадий горения, количестве стадий, интервале между стадиями, динамике изменения поверхности.

3. Установлено отличие в радиальном распределении двухпроходowego излучения усилителя яркости на парах бромида меди при распространении параллельного пучка и пучка, сформированного оптическими элементами лазерного монитора, в рабочем диапазоне температур контейнеров с бромидом меди (455–560 °С) при расстояниях до объекта наблюдения до 4 м.

4. Установлена закономерная связь контраста изображений поверхности нанопорошков металлов в бистатическом лазерном мониторе с интенсивностью независимой подсветки до 9,6 мВт/мм<sup>2</sup>.

5. Показано, что дальность наблюдения с использованием лазерного монитора определяется размерами агломератов, образующихся в процессе

горения.

6. Установлены закономерности изменения коэффициента отражения поверхности на различных стадиях горения нанопорошка алюминия, смесей порошков  $\text{наноAl} + \text{микроAl}$  и  $\text{наноAl} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

7. Визуализация поверхности с использованием лазерного монитора показала, что горение термитных смесей  $\text{TiO}_2 + \text{наноAl} + \text{C}$ ,  $\text{ZrO}_2 + \text{наноAl} + \text{C}$  и  $\text{Nb}_2\text{O}_5 + \text{наноAl} + \text{C}$  протекает по механизму «твердое тело  $\rightarrow$  газ», минуя жидкую фазу.

### **7. Практическая значимость**

1. Лабораторные установки и методики на основе лазерных мониторов позволяют исследовать временные параметры и режимы горения нанопорошков металлов и их смесей с временным разрешением до 0,8 мс и пространственным разрешением до 5 мкм.

2. Аппаратная реализация оценки средней яркости изображений лазерного монитора с помощью быстродействующих фотодиодов дает количественную информацию об изменениях поверхности образца во время горения до проведения постобработки изображений, что актуально для оптимизации эксперимента.

3. Визуализация поверхности тонких слоев нанопорошков металлов с использованием лазерного монитора позволяет наблюдать *in situ* неоднородность распространения горения по поверхности образца и образование продуктов горения и участков с частичным прогоранием.

4. Показана возможность реализации двухканального источника накачки усилителей яркости на парах бромидов меди на основе одного импульсного преобразователя и обеспечения импульсного заряда двух накопительных емкостей величиной до 1000 пФ до напряжения 6,2 кВ при стабильной работе двух газоразрядных трубок малого и среднего активного объема, как в составе двухканального, так и бистатического лазерных мониторов.

5. Совместное использование лазерного мониторинга и лазерной

подсветки в составе одного диагностического комплекса позволяет исследовать неоднородности процесса горения нанопорошков металлов и ВЭМ на их основе.

6. Двухканальный лазерный монитор дает возможность наблюдения в двух областях образца одновременно или в одной области с различным увеличением и пространственным разрешением.

7. Продемонстрирована эффективность использования метода лазерной спекл-корреляции для дистанционного исследования изменений поверхности объекта, экранированной светящимся слоем.

8. Предложенная аппаратно-программная реализация метода лазерной спекл-корреляции применима для полевых исследований и технологического контроля высокотемпературных процессов.

**7. Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечена:**

- непротиворечивостью основным законам физики и химии;
- согласием с опубликованными ранее результатами других авторов;
- корректным использованием базовой общенаучной методологии;
- корректностью постановки цели и задач при проведении исследований;
- использованием аттестованного оборудования и современных методов физико-химических исследований;
- многократным проведением измерений и статистической обработкой полученных экспериментальных данных.

**8. Выполненная диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, содержит полезный в научном и производственном отношении материал. В работе изложены новые научно-обоснованные технические решения, направленные на создание новых и усовершенствование существующих методик и подходов в исследовании процессов высокотемпературного горения высокоэнергетических материалов на основе микро- и нанопорошков металлов. Также в работе изложены новые**

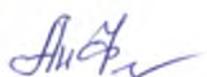
установленные закономерности морфологических изменений поверхности высокоэнергетических материалов во время высокотемпературного горения. Диссертационная работа соответствует требованиям Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», предъявляемым к докторским диссертациям, а также требованиям, приведенным во втором разделе Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «Положение о присуждении ученых степеней».

**Диссертация «Методы и аппаратура для визуализации и контроля поверхности горения высокоэнергетических материалов на основе нанопорошков металлов в режиме реального времени» Губарева Федора Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.**

Заключение принято на Ученом совете Исследовательской школы химических и биомедицинских технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Присутствовало на заседании 23 чел. С правом решающего голоса 19 чел. Результаты голосования: «за» – 19 чел., «против» – 0, «воздержалось» – 0, протокол № 7 от «24» июня 2021 г.



---



Трусова Марина Евгеньевна, д.х.н., директор  
Исследовательской школы химических и  
биомедицинских технологий  
Фефелова Анастасия Григорьевна, секретарь  
научного семинара Исследовательской школы  
химических и биомедицинских технологий

