

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Губарева Федора Александровича «Методы и аппаратура для визуализации и контроля поверхности горения высокоэнергетических материалов на основе нанопорошков металлов в режиме реального времени», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

В последнее время стали широко применяться нанопорошки металлов в качестве компонентов высокоэнергетических материалов (ВЭМ) в связи с высокой теплотой сгорания таких порошков. Процессы горения нанопорошков металлов изучаются уже десятки лет, но эта область научных исследований остается актуальной. Это связано с тем, что исследование быстропротекающих процессов горения является сложной комплексной задачей. Кроме высокой скорости химических превращений экспериментальное исследование горения затрудняется выбросами продуктов сгорания, свечением пламени, потоками горячего воздуха. Это предъявляет особые требования к методам и аппаратуре для исследования характеристик горения порошков. Между тем, развитие нанотехнологий вызывает необходимость проведения детальных исследований процессов горения *in situ*.

Существующие методы исследований позволяют определить скорость и температуру горения, фазовый состав продуктов сгорания, форму факела. Но до сих пор не было разработано методов и аппаратуры, позволяющих визуализировать поверхность образцов в процессе горения в режиме реального времени. Создание методов и приборов для визуализации и контроля поверхности горения ВЭМ на основе металлических нанопорошков является одним из важных способов изучения физических процессов и закономерностей, позволяет углубить фундаментальные знания об этом сложном процессе.

К современным методам визуализации и контроля параметров горения предъявляются большие требования по качеству получаемого изображения, скорости сбора и обработки данных. Кроме того, во многих практических задачах имеется необходимость минимизации влияния измерительной аппаратуры на объект измерения, что может быть обеспечено применением бесконтактных методов, речь о которых идет в рассматриваемой работе.

В диссертационной работе поставлена **актуальная задача** создания и совершенствования на основе методов скоростной видеосъемки с применением лазерного монитора и лазерной подсветки методик исследования высокотемпературного горения металлических нанопорошков, а также аппаратная реализация разработанных методик.

Диссертация Ф.А. Губарева является оригинальным завершённым научным исследованием, в ее основу положены результаты собственных исследований диссертанта, проводившихся в период с 2008 года. В работе получены результаты, обладающие **научной новизной**. В этих работах **впервые** показана возможность визуализировать инициирование и горение в воздухе модельных топливных смесей, прежде всего, нанопорошков металлов, сквозь ярко светящееся пламя. При этом использована модификация лазерного монитора на парах бромида меди. Такие наблюдения реализованы с временным разрешением до 0,8 мс. Также реализованы новые режимы работы усилителей яркости малой мощности сверхизлучения, что важно при исследовании легковоспламеняющихся ВЭМ. Достигнуто высокое пространственное разрешения при наблюдении лазерного инициирования тонких слоев нанопорошков металлов –

это обеспечено фокусировкой луча инициирующего лазера и пучка излучения лазерного монитора одним и тем же объективом.

Впервые разработана экспериментальная методика, позволяющая определять количество и продолжительность стадий горения, скорость горения нанопорошков металлов на основе метода лазерной спекл-корреляции.

С использованием разработанных методов и аппаратуры получены **новые** результаты по физике горения нанопорошков металлов. Установлено, что при горении нанопорошка алюминия в воздухе имеется две волны горения; при прохождении первой волны морфология поверхности практически не меняется, а на второй стадии образуются агломераты продуктов сгорания. В процессе горения изменяется отражательная способность поверхности нанопорошка металла, это приводит к изменению яркости изображения лазерного монитора до 37 %. Это позволяет количественно оценить временные параметры горения.

Результаты работы хорошо **апробированы**, многократно (в течение 15 лет) докладывались на конференциях и совещаниях различного уровня. 82 публикации, в том числе, 18 в изданиях, рекомендованных ВАК, 32 в журналах из списка Scopus и/или Web of Science, 2 монографии, полностью отражают тематику диссертации. Автореферат соответствует содержанию диссертации и включает основные ее положения.

Практическое значение представленной работы заключается в разработке лабораторных установок и методик на основе лазерного монитора для контроля параметров горения нанопорошков и их смесей. Безусловным достоинством работы является законченность разработки и реализация в виде аппаратно-программного комплекса контроля характеристик горения порошков металлов. Комплекс работает с высоким временным разрешением (до 0,8 мс) и пространственным разрешением (до 5 мкм). На основе оценки средней яркости изображений с помощью быстродействующих фотодиодов удалось реализовать контроль процесса горения в режиме реального времени. Результаты визуализации поверхности тонких слоев нанопорошков металлов в процессе горения выглядят действительно впечатляюще.

Интерес представляет разработка диссертанта, связанная с использованием метода корреляции цифровых спекл-изображений в аппаратно-программном комплексе исследования динамики горения нанопорошков, позволяющем более точно изучить скорость протекания реакции и стадии горения, чем это допускали до сих пор известные методы. Метод допускает дистанционный контроль – на расстоянии до 5 м, а экранирующий светящийся слой пламени не является помехой. Относительная простота данного метода позволит использовать его для полевых исследований и технологического контроля высокотемпературных процессов.

Теоретические результаты работы связаны, прежде всего, с полученными новыми знаниями о закономерностях горения ВЭМ на основе нанопорошков металлов. В частности, доказано, что горение нанопорошка алюминия и термитных смесей на его основе происходит по механизму твердое тело-газ, минуя жидкую фазу. Теоретически показана (и на практике реализована) возможность визуализации и контроля процессов горения этих веществ.

Работа выполнялась в рамках Государственного задания «Наука», грантов РФФИ, РНФ и Президента РФ что говорит о её **практической значимости** и актуальности. Практическая значимость и новизна работы подтверждаются также полученными автором 9 патентами РФ и двумя свидетельствами на регистрацию программ для ЭВМ.

Корректность постановки задачи, строгая физическая обоснованность, использование современной регистрирующей аппаратуры и программного обеспечения, сравнение обширных результатов измерений, выполненных различными методами и средствами, отсутствие

противоречий с известными результатами других авторов позволяют судить о **достоверности** и обоснованности полученных в диссертационном исследовании научных положений.

В диссертационной работе разработаны методики и аппаратура для экспериментальных исследований в области высокотемпературного горения нанопорошков металлов и их смесей. С использованием разработанной техники проведены исследования процессов горения нанопорошков металлов и их смесей, выявлены стадии горения и временные параметры, изучены морфологические особенности изменения поверхности в процессе горения ВЭМ – тем самым, показаны все возможности разработанной техники. Таким образом, тема и содержание диссертации **соответствует специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.**

Диссертация Губарева Ф.А. состоит из введения, шести глав, заключения, и одного приложения.

Во **введении** кратко описана проблема исследования, обоснована необходимость разработки новых методов, методик и аппаратуры для визуализации и контроля параметров высокотемпературного горения нанопорошков металлов и ВЭМ, обоснована актуальность темы диссертации, показана теоретическая и практическая значимость, и научная новизна работы. Определены цель и задачи исследования. Текст введения, практически, повторяет текст автореферата диссертации.

В **первой главе** описаны существующая техника исследования высокотемпературных процессов: лазерные проекционные системы на основе активных сред на парах металлов, методы и аппаратура для исследования динамики процессов горения ВЭМ, скоростная видеорегистрация. Также рассмотрены методы анализа корреляции лазерных спекл-изображений, применяемые в технологическом контроле для получения информации об упругих деформациях поверхности. Спекл-визуализация до сих пор не использовались в области, которой посвящено диссертационное исследование (горение порошков металлов). Существующие методы требуют доработки и совершенствования для применения в экстремальных условиях, таких, как высокотемпературное горение. В главе подводятся итоги степени разработанности темы исследования, и формулируется цель и задачи работы. Надо отметить, что цель и задачи уже сформулированы во введении, но здесь это делается более подробно.

Описанию различных вариантов лазеров и усилителей яркости на парах бромида меди посвящена **вторая глава**. На основе обзора работы активных элементов лазеров на парах бромида меди рассматривается диапазон режимов, в которых они могут функционировать. Также рассматриваются различные схемы накачки газоразрядной трубки (ГРТ) лазеров на парах металлов и указываются преимущества ГРТ с емкостной накачкой – в этом случае отсутствует прямой контакт материала электродов с газовой средой. При использовании импульсного заряда накопительной емкости работа тиратрона более стабильна, по сравнению со схемами с резонансным зарядом. Таким образом автор обосновывает выбор в пользу лазера на парах бромида меди с емкостной ГРТ в качестве лазера подсветки в бистатическом лазерном мониторе. Описана схема синхронизации импульсов излучения, которая является важным элементом лазерной системы на основе двух активных сред на парах металлов с рассогласованием не более 2 нс.

В **третьей главе** приведены результаты исследования распределения усиления в активном элементе на парах бромида меди, неоднородности усиления активной среды в усилителе яркости лазерного монитора. Это важно для получения качественного изображения при двухпроходном усилении, которое используется в работе лазерного монитора. Важный

практический вывод данного исследования заключается в определении диапазона наблюдения, который обеспечивает моностатический лазерный монитор на основе одного активного элемента – он ограничен 2-2,5 м. В этом диапазоне профиль луча имеет равномерное распределение для типичных режимов работы усилителей яркости с длительностью импульса генерации 25-40 нс.

Пожалуй, центральное место в работе следует отдать **главе четвертой**. В ней описан лазерный комплекс для скоростной визуализации и исследования параметров высокотемпературного горения и предложен ряд оптических схем на основе усилителя яркости на парах бромида меди и лазерной подсветки. Именно в этой главе описаны основные технические новации и изобретения автора. Приведены шесть различных конфигурации лазерного монитора.

- Традиционная схема построения изображения, с независимым контролем температурных параметров и малой мощностью сверхизлучения, **усовершенствованная** введением **скоростного фотодиода** для регистрации средней яркости изображений.
- Зеркальная схема построения изображения с **увеличенной дистанцией** мониторинга для исследования процессов, сопровождающихся разлетом продуктов сгорания.
- Схема с увеличенной дистанцией мониторинга и поворотной платформой для исследования **распространения фронта горения**.
- Схема для визуализации горизонтальной поверхности, в том числе для **исследования тонких слоев нанопорошков металлов**, которая позволяет исследовать небольшую область объекта с большим увеличением или широкую область объекта с относительно малым увеличением. В этой схеме лазерного монитора автором использовано воздействие иницилирующего лазерного луча через тот же объектив, который формирует изображение монитора.
- Бистатический лазерный монитор – с независимой подсветкой от второго активного элемента на парах бромида меди – такая схема **повышает яркость и контрастность** изображения горячей поверхности.
- Двухканальный лазерный монитор для **одновременного наблюдения** двух областей образца, или одной области с различным увеличением и пространственным разрешением.
- Схема лазерной подсветки со скоростной видеорегистрацией изображений горящего образца с применением непрерывного и импульсного лазеров, в том числе в составе лазерного монитора – для визуализации поверхности горения **сквозь яркосветящийся слой**.

В этой же главе приведено описание способа исследования динамики горения, предоставляющего количественные значения параметров горения на основе расчета корреляции изображений лазерного монитора.

В **пятой главе** приведено описание экспериментов по горению ВЭМ на основе порошков металлов с использованием разработанных методов и аппаратных комплексов. Продемонстрированы возможности всех описанных в четвертой главе методов и приборов. Получены новые данные о горении ВЭМ, являющихся объектами исследования. Приведены обширные экспериментальные результаты, полученные с помощью разработанных диссертантом методов и аппаратуры.

Шестая глава диссертации посвящена результатам дистанционного исследования динамики процессов горения и изменений поверхности нанопорошка алюминия с применением

метода корреляции цифровых спекл-изображений. Рассмотрены вопросы оптимизации параметров расчета коэффициента корреляции, и приведена методика обработки спекл-изображений. Безусловным преимуществом данного метода в наблюдении поверхности горения является точная регистрация времени начала движения поверхности под действием высокой температуры, что позволяет характеризовать временные параметры распространения волн горения.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

По рассматриваемой диссертационной работе Губарева Ф.А. имеются следующие **замечания и вопросы:**

1. По изложению материала: автор использует принцип изложения в соответствии с разрабатываемыми методами и измерительной техникой (по методу на главу). Не всегда понятно, где заканчивается описание степени разработанности темы, а где начинаются личные разработки автора в каждом случае.
2. Как обеспечивался режим реального времени с точки зрения обработки результатов? Поскольку исследуемые процессы отличаются высокой скоростью протекания, то необходимо применять специальные алгоритмы и методы обработки измерений для обеспечения этого режима. Какие существуют ограничения по режиму реального времени?
3. Кадры скоростной съемки, полученных с использованием лазерного монитора при визуализации горения нанопорошка алюминия (рис. 5.8 -5.10). Вряд ли можно сделать вывод только на основании визуализации, что первая стадия горения связана именно со сжиганием водорода, что во время индукционного периода происходят именно описанные химические реакции (5.9, 5.10), что затем горение переходит в газовую фазу и т.д.
4. Стр. 244, рис. 5.29. При наблюдении горения тонких слоев нанопорошка алюминия обнаружена жидкая фаза в области лазерного воздействия. Откуда это видно? Чем объясняется, что жидкая фаза наблюдается именно при горении тонких слоев порошков, но отсутствует при горении объемных образцов?
5. Стр. 256. При исследовании горения порошков на основе нано и микроалюминия с наноFe автор предлагает использовать разные схемы лазерных мониторов на разных этапах горения. На этапе инициирования – схема с большим увеличением, так как на этом этапе это безопасно для оптических элементов. Распространение горения можно наблюдать дистанционно, при меньшем увеличении, когда есть риск повреждения элементов разлетающимися продуктами реакции. Как можно реализовать совмещение этих методов на практике? Ведь за этапом инициирования сразу следует этап распространения пламени?
6. В работе предложен ряд методик и аппаратных реализаций для визуализации и контроля горения ВЭМ на основе нанопорошков металлов. Насколько универсальна данная техника? Какие существуют ограничения по измеряемым средам, временным и пространственным параметрам исследуемого процесса?
7. Полученные в работе практические результаты обширны – предложен целый ряд новых методов и средств исследования высокотемпературного горения ВЭМ. Очень помогла бы сводная таблица с перечнем разработанных методов, их пространственным и временным разрешением, областей применения.

Данные замечания не снижают общей ценности диссертационной работы.

В целом диссертационная работа Губарева Федора Александровича в полной мере отвечает требованиям Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете, п. 8, п. 9, п. 10. Это законченная, самостоятельно выполненная научно-квалификационная работа, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как крупное научное комплексное достижение в решении важной научно-технической проблемы по разработке методов и средств визуализации и контроля параметров высокотемпературного горения нанопорошков металлов.

Диссертант заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник лаборатории физики преобразования энергии высокоэнергетических материалов
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1
e-mail: olgakudr@inbox.ru
+7 _____ 4

С

О.Б. Кудряшова
26.10.21

Подпись Кудряшовой О.Б. удостоверяю

Ученый секретарь ИПХЭТ СО РАН К.С.Н.



С

А.Г. Суханова