

Отзыв официального оппонента

на диссертационную работу Ли Линь «Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Актуальность работы. Горение является быстропротекающим процессом, экспериментальное исследование которого – непростая задача. Кроме высокой скорости превращения вещества, наблюдение горения затрудняется выбросами пламени, частиц продуктов сгорания, потоками горячего воздуха. Это предъявляет особые требования к аппаратным методам исследования параметров горения. Между тем, развитие нанотехнологий вызывает необходимость, в частности, изучать процессы горения нанопорошков металлов.

Если существующие методы исследований позволяют определить температуру и скорость горения, форму факела, то подробно изучить поверхность образцов в процессе горения до сих пор не удавалось. Создание приборов, позволяющих наблюдать поверхность горения образцов в режиме реального времени позволяет углубить фундаментальные знания об этом сложном процессе.

К современным методам контроля параметров горения предъявляются большие требования по 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 базе известных методов неразрушающего контроля аппаратно-программного комплекса для исследования быстропротекающих процессов горения.

Работа выполнялась в рамках Государственного задания «Наука» (проект 11.1928.2017/4.6), что говорит о её практической значимости и актуальности.

В диссертационной работе разработан макет установки лазерного монитора для экспериментальных исследований в области высокотемпературного горения нанопорошков металлов и их смесей. Также разработан новый метод мониторинга на основе анализа спекл-изображений для наблюдения характеристик отражения поверхности объектов. Предложен метод математической обработки экспериментальных результатов в виде программного обеспечения анализа спекл-

изображений и изображений, полученных с помощью лазерного монитора. Таким образом, тема и содержание диссертации соответствует специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Структура и объем работы. Диссертация Ли Линь состоит из введения, четырех глав, заключения, и одного приложения.

Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Во **введении** кратко описана проблема исследования, обоснована необходимость использования оптических методов контроля параметров высокотемпературного горения, обоснована актуальность темы диссертации, показана практическая значимость и научная новизна работы. Определена цель и задачи исследования.

В **первой главе** (литературный обзор) описаны основные характеристики горения порошков металлов, в том числе, нанодисперсного порошка алюминия и смеси нано- и микродисперсного порошка. Рассматриваются основные методы и средства исследований динамики процессов горения порошков. Акцент делается на оптических методах лазерной визуализации и скоростной видеосъемки данных процессов. Показано, что оптические методы, как методы неразрушающего контроля, имеют ряд преимуществ перед контактными. Несмотря на очевидные преимущества, оптические методы имеют недостатки, главный из которых заключается в сложности их реализации во многих практически важных приложениях. В частности, в тех, где контролируемые процессы имеют высокую скорость, или там, где источники и приёмники зондирующего излучения могут быть выведены из строя. Существующие методы требуют доработки и совершенствования для применения в экстремальных условиях, таких, как высокотемпературное горение.

Также рассмотрен метод, использующий явление лазерных спеклов при освещении лучом лазера рассеивающих и отражающих сред. Спекл-визуализация применяется в некоторых промышленных и медицинских технологиях, но до сих пор не использовались в области, которой посвящено диссертационное исследование (горение порошков металлов).

Описанию применяемых методов и аппаратуры посвящена **вторая глава**. На основе обзора существующих методов визуализации процессов горения нано- и микropорошков показана необходимость модификации этих методов. В частности, применить синхронизацию скоростной камеры и активного элемента усилителя яркости, лазерную подсветку для наблюдения высокотемпературных процессов горения нанопорошков металлов. Далее описываются разработанные

методы, аппаратура и её компоненты. Предлагается новая техника эксперимента, основанная на обработке лазерных спеклов, которые регистрируются при освещении поверхности образца лазерным излучением. Описана математическая модель обработки цифровых спекл-изображений и структурная схема программы, реализующей такую обработку. Для верификации данной новой технологии разработан аппаратный комплекс, реализующий три дополняющих друг друга метода визуализации процесса горения.

В **третьей главе** приведено описание экспериментов по горению нанопорошков металлов с использованием разработанных методов и аппаратных комплексов. Представлены результаты исследования процесса горения нанопорошков металлов и смесей с использованием лазерного монитора в двух вариантах: с короткофокусным объективом (для получения изображения с максимальным увеличением) и с фокусным расстоянием до 0,5 м. Приведены обширные экспериментальные результаты, полученные с помощью разработанных диссертантом методов и аппаратуры.

Четвертая глава посвящена результатам исследования динамики процессов горения с применением предложенного диссертантом метода корреляции цифровых спекл-изображений. Рассмотрены вопросы оптимизации обработки спекл-изображений, зависимости точности измерений от применяемого источника излучений. Безусловным преимуществом предложенного нового метода корреляции цифровых спекл-изображений в наблюдении поверхности горения является точная регистрация времени начала движения поверхности под действием высокой температуры, что и было доказано в четвертой главе с помощью эксперимента.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

В работе получены результаты, обладающие **научной новизной**. С помощью авторского усовершенствованного лазерного монитора проведены экспериментальные исследования горения нанопорошков металлов, морфология поверхности образцов наблюдалась в режиме реального времени. Разработан метод и устройство для количественной оценки характеристик процесса горения по отражательной способности поверхности порошка. Предложена новая техника эксперимента, основанная на математическом методе корреляции спекл-изображений для точного определения временных характеристик процессов горения нанопорошков.

Практическое значение представленной работы заключается в разработке 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 и позволяет регистрировать параметры процесса горения на расстоянии до 0,5 метра, а значит, его можно использовать в исследованиях быстропротекающих процессах горения без повреждения элементов аппаратуры.

Интересная новая разработка диссертанта – это использование метода корреляции цифровых спекл-изображений в аппаратно-программном комплексе исследования динамики горения нанопорошков, позволяющее более точно изучить скорость протекания реакции и стадии горения, чем это допускали до сих пор известные методы.

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.

Изложение материала диссертационной работы в публикациях вполне достаточно: 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 6 статей в журналах, индексируемых Scopus и Web of Science, 3 патента на изобретения, 1 свидетельство о регистрации программ для ЭВМ, 12 статей в материалах конференций, индексируемых Scopus и Web of Science.

Вместе с тем по рассматриваемой диссертационной работе Ли Линь имеются следующие **замечания и вопросы**:

1. Как обеспечивался режим реального времени (кроме выбора высокоскоростных датчиков)? Обычно применяются специальные алгоритмы и методы обработки измерений для обеспечения этого режима, но мы этого не увидели в работе. Может быть, в режиме реального времени происходит только визуализация процесса, а не конечная обработка экспериментальных данных? Какие существуют ограничения по режиму реального времени?
2. Разработан аппаратно-программный комплекс для исследования динамики горения нанопорошков металлов и других рассеивающих сред на основе метода корреляции цифровых спекл-изображений (п. 3 Практической ценности результатов). Насколько универсален этот комплекс? Какие есть ограничения по измеряемым средам?
3. Инициирование процесса горения осуществлялось непрерывным лазером со средней мощностью излучения, не превышающей 200 мВт. Каково

пороговое значение средней мощности излучения инициирующего лазера на длине волны 532 нм видимого излучения?

4. Тема диссертации – «Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения». Аппаратная реализация описана в диссертации детально. Программная часть, по моему мнению, описана недостаточно подробно. Следовало бы дополнить информационную систему блок-схемой алгоритма, диаграммами и т.п.
5. Исследование горения материалов, сопровождающихся разлетом продуктов сгорания, таких как твердых топлив, является востребованной задачей. Автором показана возможность применения лазерного мониторинга для подобных исследований. В качестве замечания следует отметить недостаточно явное представление результатов визуализации на Рис. 16б автореферата. На отдельных снимках по времени следовало бы обозначить распространение фронта горения.
6. Автором отмечается: «Неоднородность усиления в центре пучка, характерная для лазеров на парах металлов, может выравниваться в первые 7–10 нс (18 нс для ГРТ большого активного объема) путем оптимизации концентрации паров рабочего вещества и введения активной добавки HBr. При этом не обеспечивается равномерный профиль на протяжении всего импульса генерации, который не влияет на качество изображения объекта, расположенного на расстоянии до 1 м от активного элемента.» (Основные положения, выносимые на защиту, п. 1). Считаю, что в автореферате следовало бы подчеркнуть: «При этом не обеспечивается равномерный профиль на протяжении всего импульса генерации, **что, тем не менее**, не влияет на качество изображения объекта, расположенного на расстоянии до 1 м от активного элемента».

Изложенные выше замечания не снижают общей ценности диссертационной работы.

В целом диссертационная работа Ли Линь в полной мере отвечает требованиям Положения ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям в области технических наук. Конкретно она соответствует п. 9 в части, относящейся к научной квалификационной работе, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научно-технических задач в области разработки методов и средств исследования параметров высокотемпературного горения. Диссертационная работа соответствует п. 8 Порядка присуждения ученых степеней в Национальном исследовательском Томском политехническом университете.

Считаю, что диссертация «Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения», является законченной научно-исследовательской работой, а диссертант Ли Линь заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук, доцент,
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

О.Б. Кудряшова

Подпись Кудряшовой Ольги Борисовны

удостоверяю: *Учредитель секретарь ИГХЭТ СО РАН, к.х.н.*

Малыгина В.В.
11.10.19