

## ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертацию Ли Линя “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.

Ли Линь, после окончания магистратуры ТПУ по направлению электроника и наноэлектроника был зачислен в аспирантуру ТПУ 01.10.2015 года. В 2019 году он завершает обучение в аспирантуре с выдачей диплома «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

Целью работы Ли Линя была разработка аппаратно-программного комплекса для наблюдения и измерения параметров высокотемпературного горения нано- и микропорошков металлов и их смесей в режиме реального времени.

Нано- и микропорошки металлов, в частности, нанопорошок алюминия и смеси на основе нано- и крупнодисперсных порошков алюминия, находят применение при производстве твердых топлив и керамических материалов. Интерес к изучению динамики высокотемпературных процессов горения нанопорошков металлов и их смесей привел к возникновению и развитию нескольких разновидностей методов исследования. Наиболее распространёнными из них являются калориметрия, пирометрия, спектрометрия, термометрия, применение синхротронного излучения, регистрация яркости собственного свечения с использованием фотодиодов, скоростная видеорегистрация.

В связи с наличием интенсивной фоновой засветки в процессе горения нанопорошка металла, непосредственное визуальное наблюдение поверхности порошка существенно затруднено. Существующие методы позволяют достаточно точно измерять температуру горения и исследовать форму плазменного факела, но не позволяют исследовать поверхность образца в режиме реального времени, в частности, исследовать форму фронта горения, морфологию поверхности, отражательную способность.

Лазер как источник монохроматического излучения имеет узкую полосу генерации и усиления. Использование лазеров и усилителей яркости в методах неразрушающего контроля и диагностики позволяет эффективно подавить интенсивную фоновую засветку и исследовать поверхность горящих образцов порошков металлов.

В диссертационной работе Ли Линя выполнен ряд исследований, направленных на разработку методов и аппаратуры для изучения высокотемпературного горения на основе усилителей яркости на парах бромида меди и низкоинтенсивной лазерной подсветки. Наиболее значимые результаты работы следующие.

Впервые реализовано наблюдение процессов горения нанопорошков металлов в воздухе с использованием лазерного монитора. Использование лазерного монитора на парах бромида меди позволило регистрировать изменения и определять характеристики поверхности образцов нанопорошков металлов во время горения с высоким временным и пространственным разрешением, несмотря на интенсивную фоновую засветку. Применение фотодиодов для регистрации интенсивности выходного сигнала усилителя яркости позволило отслеживать изменение отражения поверхности, и количественно характеризовать процесс горения.

Разработан аппаратно-программный комплекс на основе лазерного монитора с возможностью дистанционного (до 0.5 м) наблюдения поверхности горящих образцов. Использование двух схем лазерного монитора с коротким и длинным фокусным расстоянием позволило наблюдать динамику процесса горения как с микрометровым, так и с субмиллиметровым пространственным разрешением, а применение поворотной платформы позволило осуществить слежение за фронтом горения. Существенным отличием дистанционной схемы лазерного монитора от традиционных схем является возможность визуализации смесей, горения которых протекает со значительным разлетом продуктов сгорания.

Определен характер влияния параметров работы усилителя яркости на парах бромида меди на радиальное распределение усиления и оптимальные параметры работы для получения равномерного профиля усиления. Выявлено изменение радиального распределения усиления во время импульса генерации для использованных в работе усилителей яркости.

Впервые применен метод корреляции цифровых спекл-изображений для исследования временных параметров горения нанопорошков металлов. Разработан алгоритм обработки лазерных спекл-изображений, позволяющий проводить расчет коэффициента корреляции – основного параметра, характеризующего изменение отраженного от поверхности излучения. Метод корреляции цифровых спекл-изображений, в отличие от лазерного мониторинга и простого анализа яркости спекл-изображений, дает возможность регистрировать время, когда поверхность только начинает двигаться под воздействием температуры. Сочетание данного метода с анализом яркости изображений лазерного монитора обеспечивает более точную оценку временных характеристик горения нанопорошка или смеси.

В работе также применена лазерная подсветка на основе коммерческого лазера с длиной волны 532 нм с расширителем пучка для визуализации горения смесей на основе нанопорошка алюминия, которая в совокупности со скоростной видеорегистрацией позволила оценить поведение и характеристики горения нанопорошков и смесей. Лазерная подсветка интересна как метод качественного анализа процессов горения.

Проведено исследование и получены экспериментальные данные по горению нанопорошков алюминия, железа и их смесей, которые интересны с точки зрения понимания физики процесса горения высокоэнергичных материалов. Наблюдение горения модельного твердого топлива на основе микронного порошка алюминия показало перспективность применения дистанционного лазерного мониторинга для наблюдения процессов горения, сопровождающихся разлетом продуктов сгорания.

Достоверность научных положений и выводов, сделанных в диссертации, следует из надежности используемых экспериментальных методов и средств, подтверждается повторяемостью экспериментальных результатов и сравнением полученных данных с ранее опубликованными результатами.

Весь цикл исследований проведен автором диссертации лично, либо при его определяющем участии. Постановка задач исследований и анализ полученных данных осуществлялись совместно с научным руководителем. В работе, на разных её этапах, участвовали сотрудники Томского политехнического университета и Института оптики атмосферы СО РАН Ильин А.П., Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Кленовский М.С., Пеккер Я.С. и студенты Томского политехнического университета Сытник Ю.Д., Блошкина А.И., Антипов П.А.

Все результаты, представленные в диссертационной работе Ли Линя, опубликованы в ведущих периодических изданиях и неоднократно докладывались на Всероссийских и Международных конференциях, отмечались грамотами за лучшие доклады.

За время обучения в Томском политехническом университете, бакалавриате, магистратуре и аспирантуре, Ли Линь приобрел заслуженный авторитет среди студентов и сотрудников университета. Следует отметить его участие в международной деятельности. Ли Линь вел активную работу с китайскими студентами в ТПУ, а также участвовал в организации визитов китайских делегаций.

В ходе выполнения диссертационной работы Ли Линь показал высокую заинтересованность в подготовке материалов и написанию работы, качественно выполнял поставленные перед ним задачи, продемонстрировал умение работать с литературными источниками, обобщать полученные данные, делать выводы. В дополнение к научной работе, Ли Линь осуществлял педагогическую деятельность на кафедре промышленной и медицинской электроники (2015-2017 гг.) и в Исследовательской школе химических и биомедицинских технологий. На основе результатов, представленных в диссертации, им разработаны лабораторные работы, которые внедрены в учебный процесс.

Диссертационная работа “Аппаратно-программный лазерный комплекс для исследования параметров высокотемпературного горения”, выполненная Ли Линем, представляет собой законченное научное исследование, выполненное на высоком научном уровне. Считаю, что работа удовлетворяет требованиям Томского политехнического университета, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присвоения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики.

Научный руководитель  
кандидат физико-математических наук,  
доцент Исследовательской школы  
химических и биомедицинских технологий  
Томского политехнического университета

Федор Александрович Губарев

Раб. адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина 30, ТПУ  
e-mail: gubarevfa@tpu.ru; тел. 8-3822-701-810

Подпись доцента Ф.А. Губарева *зверно*  
Ученый секретарь

Ольга Афанасьевна Ананьева

23.08.197.