

# Двухканальная система визуализации высокотемпературного горения на основе скоростных камер EVERCAM F 1000-16-C

Ф.А. Губарев<sup>1</sup>, Л.Ю. Давыдова<sup>2</sup>, М.С. Цирон<sup>3</sup>

Севастопольский государственный университет (СевГУ)

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-7499-6109, [gubarevfa@mail.ru](mailto:gubarevfa@mail.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0009-0003-7026-9670, [lydavydova@sevsu.ru](mailto:lydavydova@sevsu.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0009-0006-6687-4319, [rwtciron@mail.ru](mailto:rwtciron@mail.ru)

## **Аннотация**

В работе представлены результаты применения скоростных камер Evercam F 1000-16-C для скоростной визуализации лазерного инициирования и высокотемпературного горения термитной смеси Al-CuO. Показана возможность определения параметров процессов по результатам скоростной съемки. Рассмотрены два режима визуализации: синхронная работа двух камер для получения изображений с двух ракурсов и синхронная работа двух камер в составе лазерного монитора с усилителем яркости на парах бромида меди. В случае прямой видеорегистрации одна из камер выполняет роль ведущей, и частота съемки задается программным путем. Двухракурсный режим видеорегистрации предлагается использовать для исследования распространения пламени в объеме. Впервые камеры Evercam F 1000-16-C использованы в составе лазерного монитора с усилителем яркости на парах бромида меди. Лазерный мониторинг, совмещенный с прямой видеорегистрацией, дает возможность исследования поверхности образца в области лазерного воздействия и распространения пламени в одной из плоскостей. Особенностью работы камер Evercam в составе лазерного монитора необходимость формирования цугов синхроимпульсов, синхронизованных с импульсами излучения усилителя яркости и импульсом излучения инициирующего лазера. При этом обе камеры работают как ведомые. Блок синхронизации реализован с применением платы микроконтроллера STM32F103C8T6 и имеет гальванически развязанные входные и выходные сигналы.

**Ключевые слова:** скоростная визуализация, Evercam, синхронизация, лазерный монитор, усилитель яркости, высокотемпературное горение.

## **1. Введение**

В настоящее время вопросы скоростной визуализации процессов являются актуальными для многих научно-исследовательских задач [1-12]. Это связано с возможностью детального исследования динамики процессов во времени с целью открытия новых явлений и эффектов, определения закономерностей развития и протекания физико-химических процессов. В качестве средств визуализации часто выступают скоростные камеры как иностранного, так и российского производства, при этом методология исследований и схемы экспериментов могут отличаться в зависимости от особенностей сред и динамики процессов.

По опыту реализации научно-исследовательских работ в различных сферах, можно выделить наиболее распространенные скоростные камеры для научной визуализации [13]. В работе [1] скоростная камера Photron Fastcam SA5 (США) использовалась для съемки газодинамического потока ударно-волнового течения. В работе [2] процесс ге-

нерации брызг регистрировался скоростной камерой NAC Memrecam HX-3 (Япония). Контроль развития плазмохимических процессов в работе [3] реализован при помощи промышленной камеры Baumer VLG-20 (Швейцария) и высокоскоростной монохромной камеры Fastec Imaging IN250M512 (США). В работе [4] для визуализации процесса переноса электродного металла использовалась камера скоростной съёмки Evercam 1000-4-С (Россия). При проведении экспериментальных исследований в области боевого вооружения и военной техники [5] скоростная съёмка осуществлялась камерой Evercam 4000-8-М (Россия). Горение высокоэнергетических материалов исследовалось с применением камер Fastec Imaging HiSpec1 [14], Vision Research Phantom v2512 [15], Vision Research Phantom Miro M110 [6, 10], NAC Memrecam HX-6 [13], Photron Fastcam SA1 [7].

Сложностью исследования горения высокоэнергетических материалов, и высокотемпературных процессов, в целом, является не только высокая скорость протекания процессов, но и высокая яркость излучения, сопровождающая процесс [12]. Для преодоления яркого свечения и исследования таких материалов или процессов требуется оборудование, позволяющее снизить влияние яркой фоновой засветки. Основные технические решения связаны с применением систем с активной фильтрацией и лазерной подсветкой [15]. Эти системы требуют синхронизации съёмки и подсветки. Такой принцип работы визуализации реализован в работах [14, 15].

В ряде задач визуализации необходимо синхронизировать две скоростные камеры [8, 16] для получения двух последовательностей кадров с целью увеличения информативности процесса визуализации. Как правило, производитель приводит вариант подключения камер в режиме «ведущая-ведомая» [17, 18]. Ведущая камера формирует импульсы, синхронные с экспозицией, которые подаются на вход синхронизации ведомой камеры.

При исследовании процессов лазерного инициирования горения требуется синхронизация лазерного импульса с началом записи [7, 9, 11].

Наиболее технически сложными являются варианты визуализации процессов горения с использованием одно- или двухканального лазерного монитора на основе импульсного усилителя яркости, содержащего две скоростные камеры, и лазер, осуществляющий импульсное инициирование горения [19, 20]. Лазерные мониторы на основе активной среды на парах бромида меди являются отечественной разработкой и дают возможность визуализировать поверхность горящих материалов сквозь яркую засветку, создаваемую пламенем. Лазерный монитор на основе активной среды на парах бромида меди имеет высокую спектральную яркость и малую длительность импульса излучения (20-40 нс) [21, 22].

В настоящее время системы, подобные [19, 20] реализованы на основе скоростных камер марок Phantom и Photron. В последние годы альтернативой зарубежным аналогам становятся камеры марки Evercam российского производства [23]. Их функционирование имеет ряд особенностей по сравнению с распространенными моделями, в частности, отличается принцип синхронизации, что имеет принципиальное значение при работе в составе лазерной системы визуализации на основе импульсного усилителя яркости. Поэтому целью данной работы являлась практическая реализация различных режимов синхронизации камер Evercam 1000-4-С и создание экспериментальной установки для исследования процесса лазерного инициирования высокоэнергетических материалов с их использованием.

## **2. Техника эксперимента**

### **2.1. Объект визуализации**

В качестве объекта визуализации в работе использовалась термитная смесь Al-CuO приготовленная из нанопорошков алюминия и оксида меди, полученных методом

электрического взрыва проводника [24]. Распределение частиц по размеру было близким к нормальному логарифмическому с максимумом 90 нм для нанопорошка алюминия и 50 нм для нанопорошка оксида меди. Для приготовления термитной смеси использовалось двухэтапное перемешивание. Нанопорошки засыпались в малообъемную ёмкость с весовым соотношением порошков алюминия и оксида меди 1:4 с добавлением изопропилового спирта. Первоначально перемешивание осуществлялось в смесителе типа «пьяная бочка» (ТУБУЛА С 2.0). Для более тонкой гомогенизации смеси использовалось ультразвуковое перемешивание [25]. Использовался ультразвуковой диспергатор с мощностью излучателя 75 Вт, частотой 22 кГц в течение 10 минут. Далее порошки помещались в сушильный шкаф для выпаривания спирта.

Образцы, выполненные в виде прямоугольного параллелепипеда размером  $20 \times 3 \times 3$  мм<sup>3</sup>, имели массу навески 150 мг и размещались на алюминиевой подложке толщиной 2 мм. Для инициирования использовался диодный лазер RLS-6-638/5-SMA-ТЕС с длиной волны 638 нм с оптоволоконным выводом излучения. Излучение инициирующего лазера направлялось на фронтальную поверхность образца, который размещался в фокусе лазерного луча. Мощность лазера в непрерывном режиме могла изменяться в диапазоне от 0,2 до 2 Вт. С учетом потерь в оптоволокне и на фокусирующей системе, мощность излучения, измеренная на месте образца, в непрерывном режиме могла варьироваться от 0,15 до 1,5 Вт. Диаметр пятна на объекте составлял 0,6 мм, что обеспечивало максимальную плотность мощности 5,3 Вт/мм<sup>2</sup>. Лазер имел вход внешней модуляции, который позволял задавать длительность лазерного импульса и, соответственно, энергию лазерного воздействия. При максимальной мощности лазера инициирование происходило при длительности импульса 50 мс.

## 2.2. Двухракурсная схема прямой визуализации

На рис. 1а приведена двухракурсная схема визуализации на основе двух камер скоростной съемки Evercam 1000-16-С. Камеры располагались под углом 90° друг к другу и регистрировали фронтальное (камера 1) и боковое (камера 2) изображения объекта исследования в собственном свечении образца. На фронтальную камеру был установлен объектив Canon Macro Lens EF 100 mm, на боковую – объектив MC Zenitar 1.2/50s. Ширина области зрения фронтальной камеры составляла 46 мм, боковой – 73 мм. Поскольку горение термитной смеси Al-CuO сопровождается ярким свечением и разлетом продуктов сгорания, для уменьшения засветки перед объективами камер устанавливались нейтральные светофильтры типа НС [26]. Для исключения повреждения оптических элементов устанавливались защитные кварцевые стекла перед нейтральными светофильтрами и линзой инициирующего лазера.

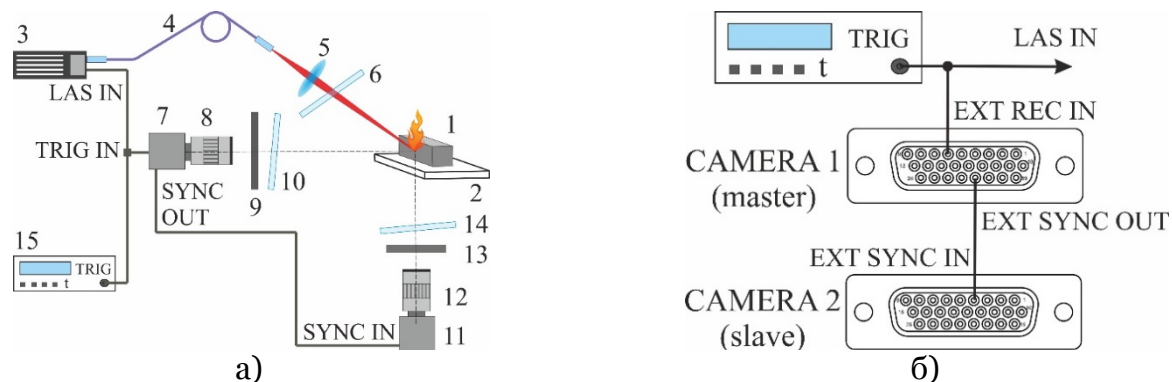


Рис. 1. Двухракурсная схема прямой визуализации (а) и схема соединения разъемов скоростных камер (б). 1 – образец; 2 – подложка; 3 – инициирующий лазер; 4 – оптоволоконный световод; 5 – линза; 6, 10, 14 – защитные стекла; 7 – фронтальная камера; 8, 12 – объективы; 9, 13 – нейтральные фильтры; 11 – боковая камера; 15 – генератор импульсов.

Запись изображений осуществлялась со скоростью 5000 кадров/с; пространственное разрешение матрицы при этом устанавливалось 640×192 пикселей. Особенностью работы Evercam 1000-16-C является возможность работы при полном горизонтальном разрешении матрицы 1920 пикселей. При увеличении скорости съемки уменьшается разрешение по вертикали.

Синхронизация камер осуществлялась согласно схеме, рекомендуемой производителем [23], в которой камера 1 работала в качестве ведущей, а камера 2 в качестве ведомой. Соответствующее подключение разъемов камер показано на рис. 1б. Запись ведущей камерой начинается по переднему фронту сигнала на входе “EXT REC IN” и продолжается, пока количество записанных импульсов не достигнет предустановленного программно значения или значения, ограниченного объемом встроенной памяти. При этом длительность сигнала на входе “EXT REC IN” не влияет на запись, но не должна превышать длительность всей записи  $t_{\text{п}} = N_{\text{п}}/f$ , где  $N_{\text{п}}$  – предустановленное количество записанных изображений,  $f$  – скорость записи (кадров в секунду). Эта особенность работы камеры позволяет один и тот же сигнал подавать на вход “EXT REC IN” камеры и на вход разрешения лазера, который формирует длительность лазерного излучения в соответствии с длительностью импульса разрешающего импульса. Для формирования лазерных импульсов длительностью до 400 мс использовался одноканальный UTG962E.

Во время записи ведущая камера формирует на выходе “EXT SYNC OUT” импульсы длительностью 3,2 мкс, синхронные с экспозицией камеры. Для синхронизации двух камер импульсы с выхода “EXT SYNC OUT” ведущей камеры подаются на вход “EXT SYNC IN” ведомой камеры (рис. 1б). Режим ведомой камеры устанавливается в сервисной программе. Особенностью работы камеры Evercam 1000-16-C в режиме ведомой является нечувствительность к сигналу на входе “EXT REC IN”. Запись изображений определяется только наличием синхроимпульсов на входе “EXT SYNC IN”. При этом ведомая камера также формирует импульсы “EXT SYNC OUT”, по которым мы можем сделать вывод о синхронной работе камер. На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов синхронизации.

Задержка между импульсами “EXT SYNC OUT” камер составляет 0,3 мкс, задержка по отношению к сигналу “EXT REC IN” составляет 60 мкс. Для записи осциллограмм использовался осциллограф SDS70102V. Таким образом, начало воздействия иницирующего лазера и запуск съемки обеих камер происходят практически одновременно. Это дает возможность исследования процесса лазерного иницирования, начиная с первых моментов нагревающего действия лазера.

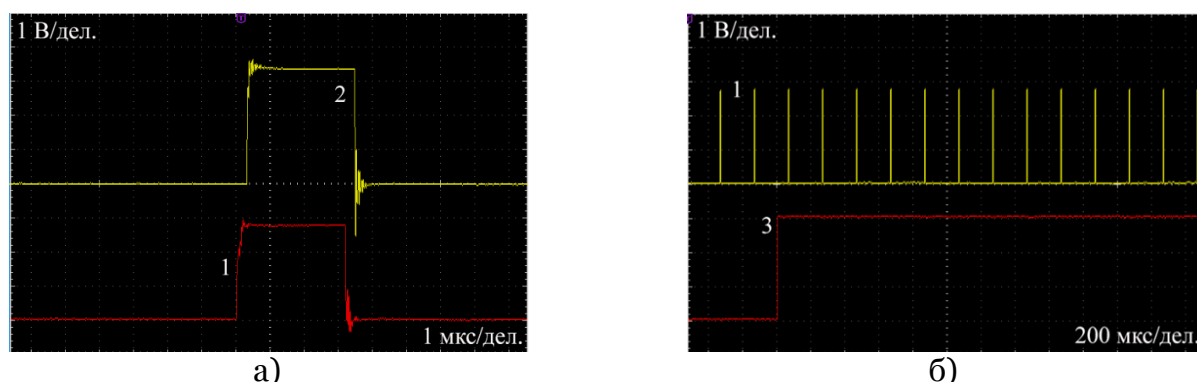


Рис. 2. Осциллограммы импульсов синхронизации. а – синхроимпульсы “EXT SYNC OUT” ведущей (1) и “EXT SYNC OUT” ведомой (2) камер; б – синхроимпульсы “EXT SYNC OUT” ведущей камеры (1) и импульс разрешения лазерного излучения/“EXT REC IN” (3).

## 2.3. Лазерный монитор

На рис. 3 приведена схема лазерного монитора на основе двух камер Evercam 1000-16-С. Принцип построения оптической части лазерного монитора аналогичный использованному в работе [19]. Изображение формировалось линзой 18 диаметром 10 см с фокусным расстоянием 50 см. Диаметр области, освещаемой усилителем яркости, составлял 4,5 мм. Выходное излучение усилителя яркости фокусировалась на матрице скоростной камеры 7 объективом 8 MC Zenitar 1.2/50s. Регистрируемая область наблюдения составляла  $4,0 \times 1,2 \text{ мм}^2$  с пространственным разрешением 12,5 мкм. Разброс продуктов сгорания при горении термитной смеси Al-CuO может превышать 50 см, поэтому перед линзой устанавливалось защитное кварцевое стекло. Разброс

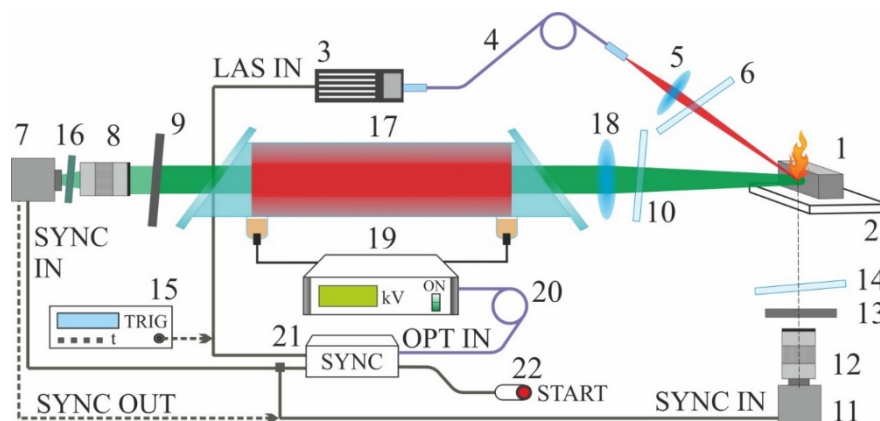


Рис. 3. Лазерный монитор. 1 – образец; 2 – подложка; 3 – инициирующий лазер; 4 – оптоволоконный световод; 5 – линза; 6, 10, 14 – защитные кварцевые стекла; 7 – камера лазерного монитора; 8, 12 – объективы; 9, 13 – нейтральные светофильтры; 11 – боковая камера; 15 – генератор импульсов; 16 – фильтр  $510 \pm 5 \text{ нм}$ ; 17 – усилитель яркости; 18 – линза, формирующая изображение; 19 – блок питания усилителя яркости; 20 – оптоволоконный световод; 21 – блок синхронизации; 22 – кнопка начала исследования.

В работе использовался усилитель яркости на парах бромида меди с газоразрядной трубкой (ГРТ) диаметром 3 см и длиной активной части (внутри внешнего нагревателя) 60 см. ГРТ имела отпаиваемую конструкцию с внешним нагревом усиливающей среды, аналогичную использованной ранее в системах с усилением яркости в работах [6, 7, 20]. Внешний вид и особенности конструкции приведены в работе [20]. Для накачки активной среды использовался источник высоковольтных импульсов с импульсным зарядом рабочей емкости, рассмотренный в работе [20]. Частота следования импульсов (ЧСИ) накачки, а, следовательно, и ЧСИ лазерного излучения, составляла 20 кГц. Условия эксплуатации были оптимизированы для обеспечения однородного профиля луча усиленного спонтанного излучения (ASE) и относительно низкой средней мощности ASE – 26 мВт на длине волны 510,6 нм. Данный режим работы усилителя яркости рассмотрен в работе [27]. Малая средняя мощность ASE при относительно большой области наблюдения обеспечивала чрезвычайно малую плотность мощности излучения лазерного монитора на поверхности объекта исследования ( $1,6 \text{ мВт/мм}^2$ ), не оказывала заметного воздействия на поверхность объекта наблюдения и исключала вероятность неконтролируемого инициирования.

Несмотря на высокую яркость излучения усилителя яркости на зеленой линии, установки только нейтрального фильтра 9 между усилителем яркости и объективом 8 было недостаточно для подавления засветки, создаваемой яркостным свечением объекта исследования, проходящим по оптическому пути лазерного монитора. На сегодня горение термитной смеси Al-CuO является самым яркосветящимся объектом из иссле-



дованных с использованием лазерного монитора. В связи с этим требовалась установка полосового фильтра 16 с полосой пропускания  $510 \pm 5$  нм.

Боковая скоростная камера Evercam 1000-16-C 11 с объективом MC Zenitar 1.2/50s 12 устанавливалась под углом  $90^\circ$  к оптической оси усилителя яркости. Для уменьшения засветки перед объективом устанавливались нейтральные светофильтры типа НС. Запись изображений, как и в двухракурсной схеме, осуществлялась со скоростью 5000 кадров/с; пространственное разрешение матрицы при этом устанавливалось  $640 \times 192$  пикселей как для боковых изображений в собственном свечении, так и для изображений лазерного монитора.

Усилитель яркости работает в импульсном высокочастотном режиме с длительностью импульса десятки наносекунд [20, 21]. Таким образом, для обеспечения одинакового экспонирования матрицы скоростной камеры, необходимо синхронизовать последовательность кадров съемки с последовательностью импульсов излучения активной среды усилителя яркости. Матрица камеры может быть экспонирована одним или несколькими импульсами лазерного излучения [19].

В данной работе синхронизации выполнена с применением платы микроконтроллера STM32F103C8T6. Внешний вид и схема выводов блока синхронизации показана на рис. 4.

Для минимизации помех от высоковольтных импульсов накачки активной среды электронная схема помещена в металлический корпус, а входные и выходные сигналы имеют оптическую развязку. По оптоволоконному каналу "OPT IN" (20 на рис. 3), реализованному с использованием комплекта HFBR-0500Z, импульсы, синхронные с импульсами накачки активной среды, поступают на вход микроконтроллера. На входы микроконтроллера также поступают сигналы с кнопки "START" или с внешнего генератора импульсов "TRIG".

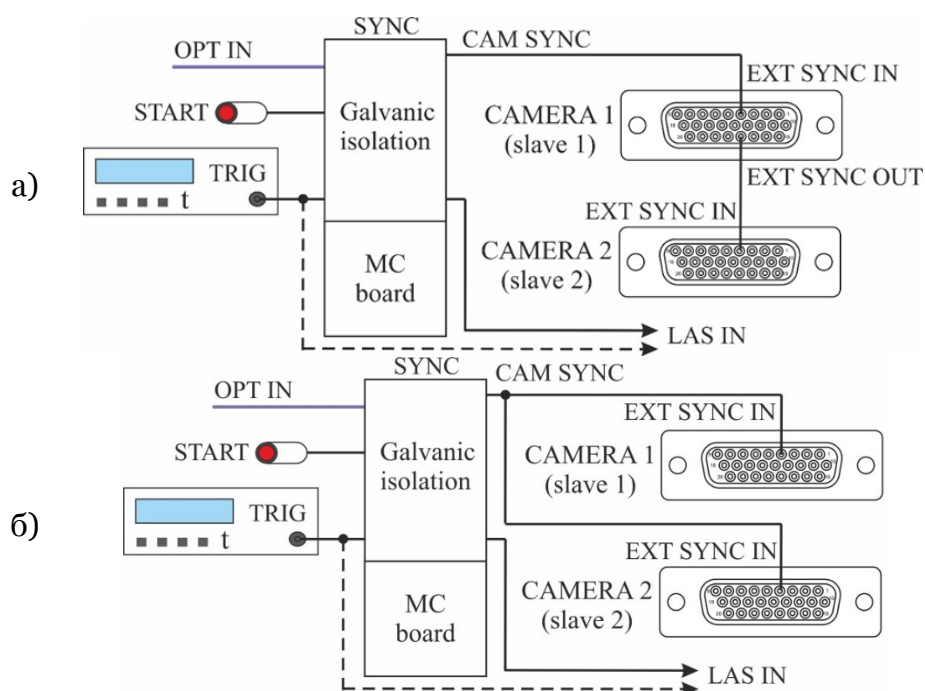




Рис. 4. Схема синхронизации на основе платы микроконтроллера STM32F103C8T6. а – последовательная синхронизация; б – параллельная синхронизация; в – фотография блока синхронизации и подключения скоростных камер. 1 – ведомая камера 1 (в составе лазерного монитора); 2 – ведомая камера 2 (боковая камера); 3 – блок синхронизации; 4 – внешний генератор; 5 – оптический канал “OPT IN”; 6 – выходы и входы блока синхронизации; 7 – вход “EXT SYNC IN” ведомой камеры 1; 8 – выход “EXT SYNC OUT” ведомой камеры 1; 9 – вход “EXT SYNC IN” ведомой камеры 2.

Микроконтроллер формирует два выходных сигнала: сигнал внешней синхронизации скоростной камеры “CAM SYNC” и сигнал разрешения лазерного излучения “LAS IN”. Входные и выходные сигналы микроконтроллера гальванически развязаны с использованием оптронов FOD817. Блок синхронизации имеет два гальванически развязанных источника питания.

В программе микроконтроллера предустановлены пять значений длительности импульса лазерного излучения, которые выбираются переключателем, для осуществления воздействия на исследуемый образец для режима работы от кнопки “START”. По нажатию этой кнопки формируется сигнал “LAS IN” и цуг импульсов “CAM SYNC”, проиллюстрированные осциллограммами на рис. 5.

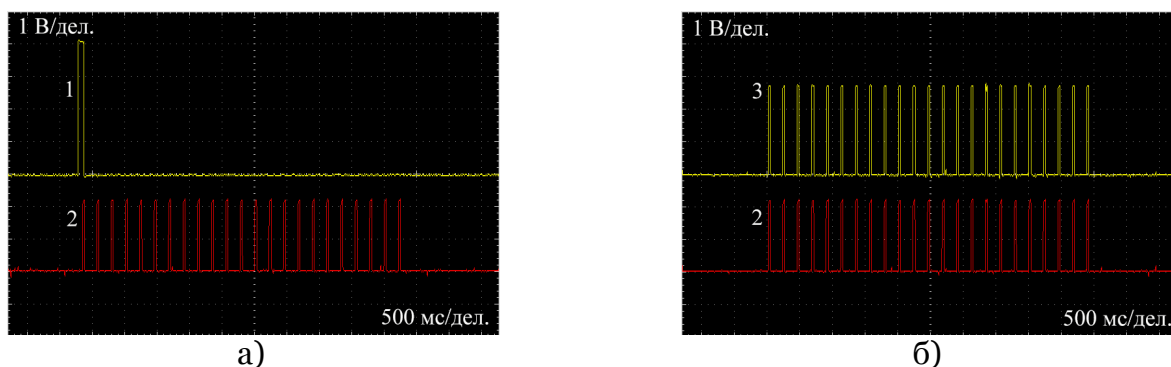


Рис. 5. Осциллограммы импульсов синхронизации. а – импульсы разрешения генерации LAS IN (1) и сигнал “CAM SYNC” (2) блока синхронизации; б – синхроимпульсы “EXT SYNC IN/CAM SYNC” (2) и “EXT SYNC OUT” (3) ведущей камеры 1.

Количество импульсов в цуге предустанавливается программно. Важно соблюдать, чтобы это значение было меньше значения, установленного в сервисной программе, для избежания перезаписи кадров и потери начального фрагмента записи. В случае, если требуется длительность импульсов лазерного излучения, отличная от предустановленных, используется внешний генератор, сигнал с которого подается напрямую на вход разрешения лазера; формирование цуга импульсов “CAM SYNC” начинается также по этому сигналу. Так как момент начала записи произвольный по отношению к импульсам излучения усилителя яркости, то задержка первого импульса “CAM SYNC” по отношению к фронту сигнала “LAS IN” варьируется от 200 до 250 мкс.

В программе микроконтроллера предустановлены пять значений (4, 6, 10, 20, 40) коэффициента деления частоты следования импульсов, поступающих по оптическому каналу от источника накачки усилителя яркости. Таким образом, блок синхронизации формирует цуг импульсов с частотой 5.0, 3.33, 2.0, 1.0 или 0.5 кГц, синхронизированных с импульсами излучения усилителя яркости. По импульсам этого цуга производится запись кадров цифровыми камерами со скоростью записи 5000, 3333, 2000, 1000 и 500 кадров/сек.

Нами апробированы два варианта синхронизации съемки двумя камерами Evercam 1000-16-С. Для обеих камер в сервисной программе устанавливался режим «ведомый». Какая из камер, в составе лазерного монитора 7 или боковая 11 на рис. 3, является ведомой 1 или ведомой 2 значения не имеет. В первом варианте синхронизации импульсы с выхода «EXT SYNC OUT» ведомой камеры 1 подавались на вход «EXT SYNC IN» ведомой камеры 2 (рис. 4а). При этом на вход «EXT SYNC IN» ведомой камеры 1 подавались импульсы «CAM SYNC» с блока синхронизации. Важно отметить, что длительность сигнала «EXT SYNC OUT» ведомой камеры 1, как и ведомой камеры 2, повторяет длительность сигнала на входе «EXT SYNC IN» (40 мкс).

Во втором варианте импульсы «CAM SYNC» с блока синхронизации подавались на входы «EXT SYNC IN» обеих камер. Соответственно, выход «EXT SYNC OUT» не подключался. Поскольку задержка формирования сигнала «EXT SYNC OUT» по отношению к «EXT SYNC IN» составляет 0,3 мкс, она не является критичной. Поэтому оба режима синхронизации являются приемлемыми и обеспечивают требуемый режим съемки.

### 3. Применение схем визуализации

#### 3.1. Двухракурсная визуализация горения

На рис. 6 приведены результаты визуализации процесса горения образца Al-CuO, полученные с использованием двухракурсной схемы визуализации. Очевидно, что область лазерного воздействия лучше видна на изображениях фронтальной камеры, которая дает возможность регистрировать динамику протекания процесса, начиная с первых моментов нагревающего действия иницирующего лазера. По данным этой камеры было установлено время начала горения образца (110,6 мс). Данный параметр является важным для оценки энергии инициирования.

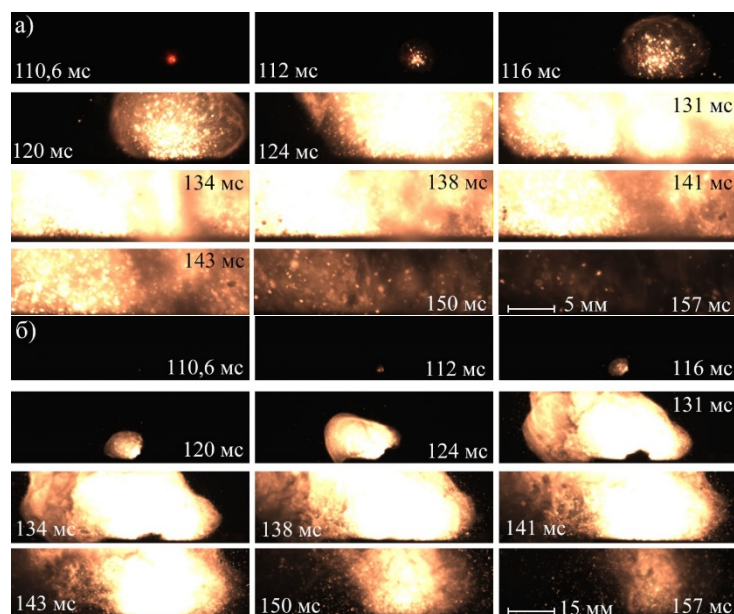


Рис. 6. Визуализация горения смеси Al-CuO (образец 1) в двухракурсной схеме (рис. 1а).  
а – фронтальный вид; б – боковой вид.



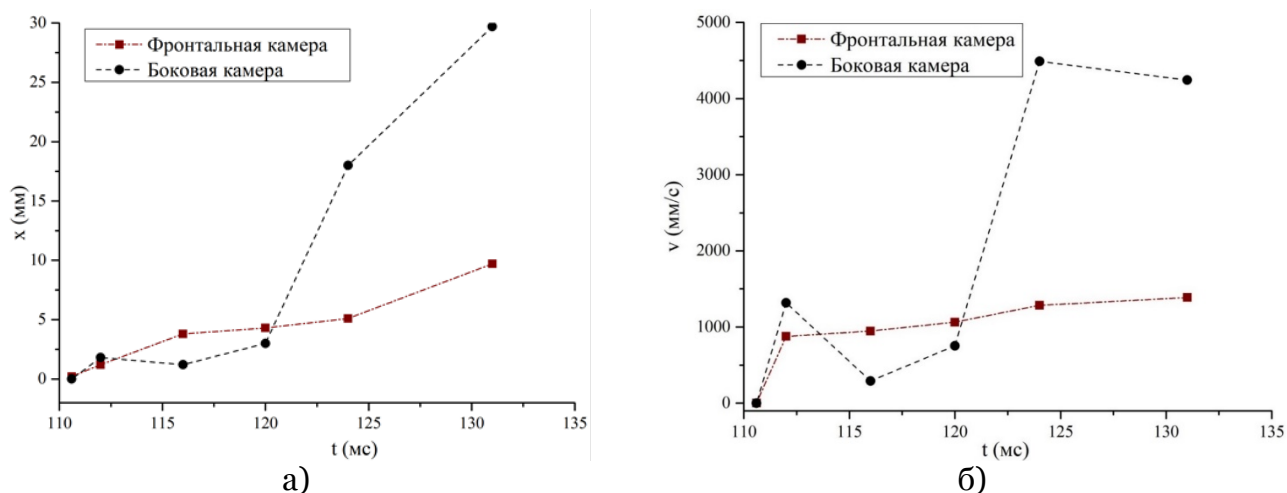


Рис. 7. Перемещение (а) и скорость распространения фронта горения (б), соответствующие процессу на рис. 6

Из полученных данных следует, что скорость распространения пламени в горизонтальном и вертикальном направлениях может отличаться в пределах порядка величины. Полученные данные могут использоваться для создания или верификации пространственной модели горения термитной смеси Al-CuO.

### 3.2. Визуализация с использованием лазерного монитора

Отличием лазерного мониторинга от прямой скоростной визуализации является наблюдение поверхности, по которой распространяется горение. На рис. 8 показаны кадры скоростной видеозаписи изображений лазерного монитора, синхронные с кадрами прямой видеосъемки сбоку.

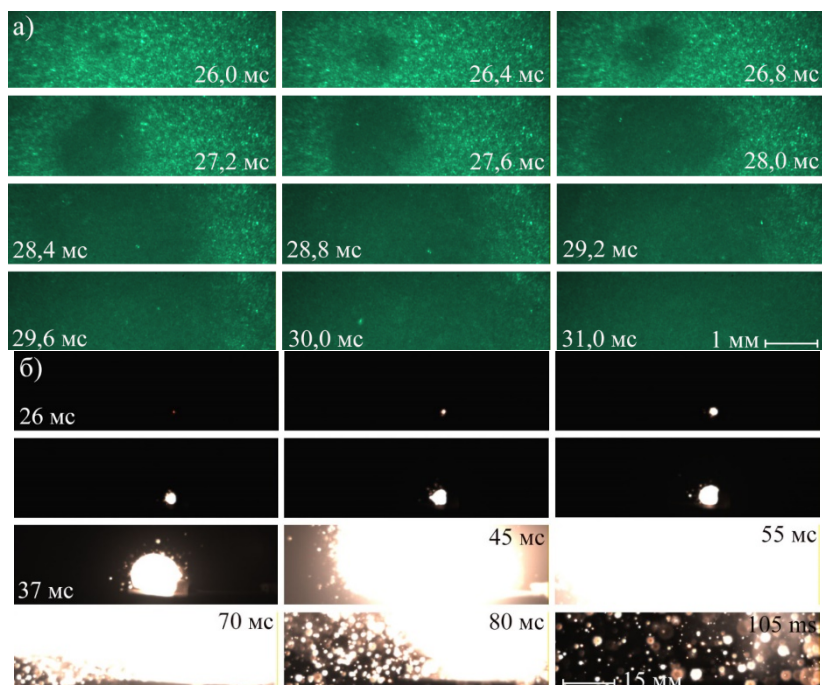


Рис. 8. Визуализация горения смеси Al-CuO (образец 2) в схеме лазерного монитора (рис. 3). а – изображение лазерного монитора; б – боковой вид.

Время процесса, рассчитанное по изображениям лазерного монитора, представляет собой время протекания процесса только в области зрения. Боковая камера обеспечивает обзор всего процесса горения. На рис. 9 приведены графики изменения скорости

распространения фронта горения по поверхности и соответствующее им распространение пламени. Данные показывают существенную неоднородность горения исследованной смеси.

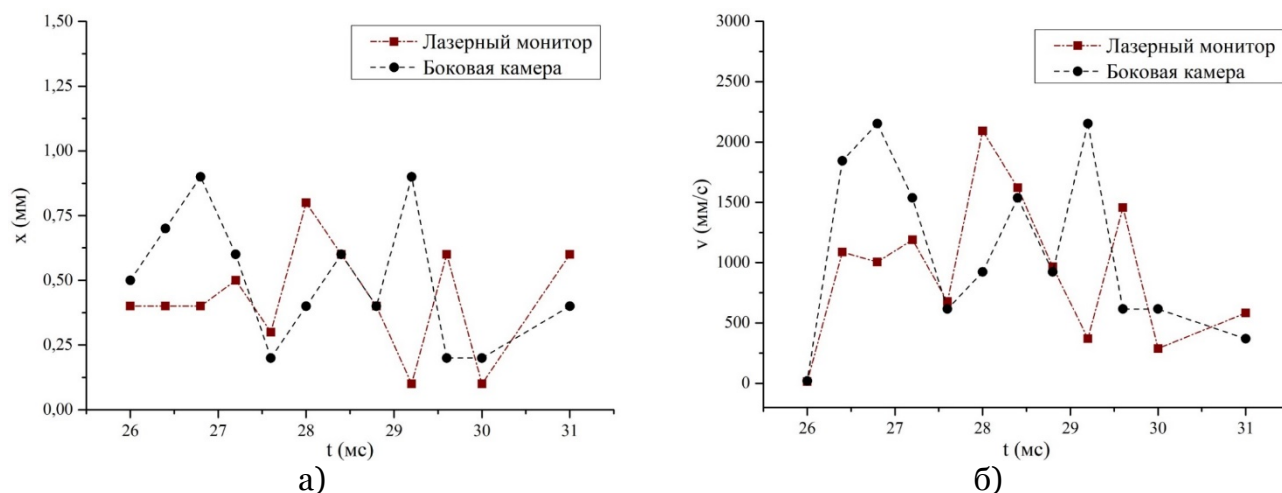


Рис. 9. Перемещение (а) и скорость распространения фронта горения (б), соответствующие процессу на рис. 8.

## 4. Заключение

В работе рассмотрена синхронная работа двух скоростных камер Evercam F 1000-16-C (Россия) в составе схемы двухракурсной скоростной визуализации и для записи изображений в схеме визуализации с усилением яркости (лазерном мониторе). Для работы скоростной камеры Evercam F 1000-16-C в составе лазерного монитора с усилителем яркости на парах бромида меди разработана схема синхронизации на основе платы микроконтроллера STM32F103C8T6, позволяющая реализовать цуговый режим записи изображений.

Впервые указанные камеры использовались для скоростной визуализации лазерного инициирования и высокотемпературного горения термитных смесей со скоростью горения до 4,5 м/с (на примере смеси нанопорошков Al-CuO). В двухракурсной схеме визуализации протекание процесса горения образца синхронно фиксируется с двух позиций, что дает возможность определить не только временные характеристики процесса в различных направлениях, но и составить пространственное представление о параметрах и интенсивности излучения, сопровождающего горение. Таким образом, получить данные, на основании которых возможно разработать или верифицировать 3D-модель процесса горения.

Полученный опыт использования камер Evercam F 1000-16-C и реализация лазерного монитора с использованием данных камер в дальнейшем будут использоваться для более детального исследования горения термитных смесей и других высокоэнергетических материалов.

## Благодарности

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории физикохимии высокодисперсных материалов Института физики прочности и материаловедения СО РАН (г. Томск) за предоставленные нанопорошки.

Приготовление смесей нанопорошков осуществлялось с использованием оборудования ЦКП «Перспективные материалы и технологии» Севастопольского государственного университета.

## Список литературы

1. Знаменская И.А., Карнозова Е.А., Муратов М.И., Луцкий А.Е. Термографическая визуализация в высокоскоростных газодинамических потоках // Труды XVII Международной научно-технической конференции. М.: Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН, 2023. – С. 138-146.
2. Сергеев Д.А., Троицкая Ю.И., Черданцев А.В. Исследование оптическими методами явлений генерации брызг по типу "парашют" в природных и технических системах // Научная визуализация, Т. 15, № 3, 2023, С. 83-91 (doi: 10.26583/sv.15.3.09) (<https://sv-journal.org/2023-3/09/>)
3. Тригуб М.В., Малахов Д.В., Степахин В.Д., Евтушенко Г.С., Балабанов Д.А., Скворцова Н.Н. Высокоскоростная визуализация плазмохимического синтеза в цепных быстропротекающих процессах, инициируемых излучением гиротрона // Оптика атмосферы и океана, Т. 33, №3, 2020, С. 199-204. (doi: 10.15372/AOO20200308)
4. Болотов С.В., Хомченко А.В., Шульга А.В., Болотова Е.Л. Информационно-измерительный комплекс для исследования процессов плавления и переноса электродного металла при дуговой сварке // Вестник Брянского государственного технического университета, Т. 91, № 6, 2020, С. 4-11 (doi: 10.30987/1999-8775-2020-6-4-11)
5. Дьячков Ю.А., Краснов М.Н., Камшин С.В., Новичков С.А., Коротков Д.И. Экспериментальное исследование натурной модели дульного тормоза оружия малого калибра // Военное обозрение, Т. 12, № 2, 2022, С. 30-34.
6. Gubarev F.A., Kim S., Li L., Mostovshchikov A.V., Il'in A.P. High-speed optical imaging technique for combusting metal nanopowders // Instruments and Experimental Techniques, № 63(3), 2020, pp. 375-382 (doi: 10.1016/j.optlastec.2022.108981)
7. Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Antipov P.A., Shiyanov D.V., Gubarev F.A. In situ nanopowder combustion visualization using laser systems with brightness amplification // Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 38, 2021, pp. 1695–1702 (doi: 10.1016/j.proci.2020.08.048)
8. Jiang Y., Wang Y., Baek J., Wang H., Gottfried J.L., Wu C.-C., Shi X., Zachariah M.R., Zheng X. Ignition and combustion of Perfluoroalkyl-functionalized aluminum nanoparticles and nanothermite // Combustion and Flame, Vol. 242, 2022, 112170 (<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112170>)
9. Wainwright E.R., Dean S.W., Vummidi Lakshman S., Weihs T.P., Gottfried J.L. Evaluating compositional effects on the laser-induced combustion and shock velocities of Al/Zr-based composite fuels // Combustion and Flame, Vol. 213, 2020, pp. 357-368 (<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.12.009>)
10. Kline D.J., Alibay Z., Rehwoldt M.C., Idrogo-Lam A., Hamilton S.G., Biswas P., Xu F., Zachariah M.R. Experimental observation of the heat transfer mechanisms that drive propagation in additively manufactured energetic materials // Combustion and Flame, Vol. 215, 2020, pp. 417-424, (<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.01.020>)
11. Dolgoborodov A.Yu, Kirilenko V.G., Brazhnikov M.A., Grishin L.I., Kuskov M.L., Valyano G.E. Ignition of nanothermites by a laser diode pulse // Defence Technology, Vol. 18, I. 18, 2022, pp. 194-204 (doi: 10.1016/j.dt.2021.01.006)
12. Громов А.А., Хабас Т.А., Ильин А.П., Попенко Е.М., Коротких А.Г., Архипов В.А., Дитц А.А., Строкова Ю.И., Толбанова Л.О. Горение нанопорошков металлов. Томск: Дельтаплан, 2008.
13. Manin J., Skeen S.A., Pickett L.M. Performance comparison of state-of-the-art high-speed video cameras for scientific applications // Optical Engineering, Vol 57, I. 12, 2018, 124105 (doi: 10.1117/1.OE.57.12.124105)

14. Li L., Ilyin A.P., Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Klenovskii M.S., Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor // *Ceramics International*, Vol. 44, № 16, 2018, (doi:10.1016/j.ceramint.2018.07.237)
15. Zepper E.T., Pantoya M.L., Bhattacharya S., Marston J.O., Neuber A.A., Heaps R.J. Peering through the flames: imaging techniques for reacting aluminum powders // *Applied Optics*, Vol. 56, 2017, pp. 2535-2541 (doi:10.1364/AO.56.002535)
16. Wang H., Kline D.J., Biswas P., Zachariah M.R. Connecting agglomeration and burn rate in a thermite reaction: Role of oxidizer morphology // *Combustion and Flame*, Vol. 231, 2021, 111492, (<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111492>)
17. Баранов П.С., Манцетов А.А., Белоус Д.А., Дмитриева А.Ю. Построение телевизионных систем высокой кадровой частоты для регистрации быстропротекающих процессов // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*, № 4, 2017, С. 35-43.
18. Vision Research Inc. <https://www.phantomhighspeed.com/products> (дата обращения: 04.07.2024)
19. Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Li L. Two-brightness-amplifier imaging system for energetic-materials-combustion study // *Optics and Laser Technology*, Vol. 159, 2023, 108981 (doi:10.1016/j.optlastec.2022.108981)
20. Burkin E.Y., Gubarev F.A., Sviridov V.V., Shiyanov D.V. Two-channel power supply for an imaging system with copper bromide vapor brightness amplifiers // *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 19, №3, 2023 (<https://doi.org/10.22068/IJEEE.19.3.2617>)
21. Петраш Г.Г. Оптические системы с усилителями яркости. М.: Наука, 1991.
22. Evtushenko G.S. Methods and instruments for visual and optical diagnostics of objects and fast processes. Nova Science Publishers. New York, USA, 2018.
23. Высокоскоростные камеры EVERCAM, EVERCAM F, EVERCAM HR, EVERCAM HS, EVERCAM L, EVERCAM FL. Руководство пользователя. Версия 5.00. <https://evercam.ru/dokumentatsiya/> (Дата обращения: 04.07.2024)
24. Pervikov A., Toropkov N., Kazantsev S., Bakina O.V., Glazkova E., Lerner M. Preparation of nano/micro bimodal aluminum powder by electrical explosion of wires // *Materials*, № 14, 2021, 6602 (<https://doi.org/10.3390/ma14216602>)
25. Toropkov, N.E., Sagun, A.I., Kudryashova, O.B., Lerner, M.I. Optimal Conditions for ultrasonic treatment of powder suspensions to obtain homogeneous thermite mixtures // *Russian Physics Journal*, Vol. 66, № 9, 2023, pp. 978-982 (doi: 10.1007/s11182-023-03032-w)
26. Петровский Г.Т. Цветное оптическое стекло и особые стекла. М.: Дом оптики, 1990.
27. Li L., Shiyanov D.V., Gubarev F.A. Spatial-temporal radiation distribution in a CuBr vapor brightness amplifier in a real laser monitor scheme // *Applied Physics B: Lasers and Optics*, Vol. 126, № 10, 2020, 155 (<https://link.springer.com/article/10.1007/s00340-020-07511-7>)



# Two-Channel High-Temperature Combustion Imaging System Based on High-Speed Cameras EVERCAM F 1000-16-C

F.A. Gubarev<sup>1</sup>, L.Yu. Davydova<sup>2</sup>, M.S. Tsiron<sup>3</sup>

Sevastopol State University (SevSU)

<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-7499-6109, [gubarevfa@mail.ru](mailto:gubarevfa@mail.ru)

<sup>2</sup> ORCID: 0009-0003-7026-9670, [lydavydova@sevsu.ru](mailto:lydavydova@sevsu.ru)

<sup>3</sup> ORCID: 0009-0006-6687-4319, [rwtciron@mail.ru](mailto:rwtciron@mail.ru)

## **Abstract**

The paper presents the results of using Evercam F 1000-16-C high-speed cameras for high-speed visualization of laser initiation and high-temperature combustion of Al-CuO thermite mixture. The possibility of determining process parameters based on the results of high-speed shooting is demonstrated. Two visualization modes are considered: synchronous operation of two cameras to obtain images from two angles, and synchronous operation of two cameras as part of a laser monitor with a copper bromide vapor brightness amplifier. In the case of direct video recording, one of the cameras acts as the master one, and the recording frequency is set in the service program. It is proposed to use a two-angle video recording mode to study the spread of flame in a volume. For the first time, Evercam F 1000-16-C cameras were used as part of a laser monitor with a copper bromide vapor brightness amplifier. Laser monitoring, combined with direct video recording, makes it possible to study the surface of a sample in the area of igniting laser interaction and flame propagation in one of the planes. A feature of the operation of Evercam cameras as part of a laser monitor is the need to generate trains of clock pulses synchronized with the radiation pulses of the brightness amplifier and the radiation pulse of the igniting laser. In this case, both cameras work in slave mode. The synchronization unit is designed using the STM32F103C8T6 microcontroller board and has galvanically isolated input and output signals.

**Keywords:** high-speed visualization, Evercam, synchronization, laser monitor, brightness amplifier, high-temperature combustion.

## **References**

1. Znamenskaya I.A., Karnozova E.A., Muratov M.I., Lutsky A.E. Thermographic visualization in high speed gas dynamic flows // Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference. Moscow: Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, 2023. – pp. 138-146 [in Russian].
2. Sergeev D.A., Troitskaya Yu.I., Cherdantsev A.V. Investigation of the spray generation due to bag breakup fragmentation phenomena with optical methods in environmental and technical systems // Scientific Visualization, Vol. 15, № 3, 2023, (doi: 10.26583/sv.15.3.09) (<https://sv-journal.org/2023-3/09/>).
3. Trigub M.V., Malakhov D.V., Stepakhin V.D., Evtushenko G.S., Balabanov D.A., Skvortsova N.N. High-speed imaging of plasmachemical synthesis in fast-flowing chain processes initiated by gyrotron radiation // Atmospheric and Oceanic Optics, Vol. 33, № 3, 2020, pp. 199-204 (doi: 10.15372/AOO20200308) [in Russian].
4. Bolotov S.V., Homchenko A.V., Shul'ga A.V., Bolotova E.L. Information-measuring complex for investigation of melting and electrode metal transfer of arc welding // Bulletin of the Bryansk State Technical University, Vol. 91, №6(91), 2020, pp. 4-11 [in Russian].

5. Dyachkov Yu.A., Krasnov M.N., Kamshin S.V., Novichok S.A., Korotkov D.I. Experimental study of a full-scale model of a muzzle brake of a small caliber // *Voennoe obozrenie* [Military Review], №2(12), 2022, pp.30-34 [in Russian].
6. Gubarev F.A., Kim S., Li L., Mostovshchikov A.V., Il'in A.P. High-speed optical imaging technique for combusting metal nanopowders // *Instruments and Experimental Techniques*, №63(3), 2020, pp. 375-382 (doi: 10.1016/j.optlastec.2022.108981)
7. Li L., Mostovshchikov A.V., Ilyin A.P., Antipov P.A., Shiyanov D.V., Gubarev F.A. In situ nanopowder combustion visualization using laser systems with brightness amplification // *Proceedings of the Combustion Institute*, Vol. 38, 2021, pp. 1695–1702 (doi: 10.1016/j.proci.2020.08.048)
8. Jiang Y., Wang Y., Baek J., Wang H., Gottfried J.L., Wu C.-C., Shi X., Zachariah M.R., Zheng X. Ignition and combustion of Perfluoroalkyl-functionalized aluminum nanoparticles and nanothermite // *Combustion and Flame*, Vol. 242, 2022, 112170 (<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2022.112170>)
9. Wainwright E.R., Dean S.W., Vummidi Lakshman S., Weihs T.P., Gottfried J.L. Evaluating compositional effects on the laser-induced combustion and shock velocities of Al/Zr-based composite fuels // *Combustion and Flame*, Vol. 213, 2020, pp. 357-368 (<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2019.12.009>)
10. Kline D.J., Alibay Z., Rehwoldt M.C., Idrogo-Lam A., Hamilton S.G., Biswas P., Xu F., Zachariah M.R. Experimental observation of the heat transfer mechanisms that drive propagation in additively manufactured energetic materials // *Combustion and Flame*, Vol. 215, 2020, pp. 417-424, (<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.01.020>)
11. Dolgoborodov A.Yu, Kirilenko V.G., Brazhnikov M.A., Grishin L.I., Kuskov M.L., Val'vano G.E. Ignition of nanothermites by a laser diode pulse // *Defence Technology*, Vol. 18, I. 18, 2022, pp. 194-204 (doi: 10.1016/j.dt.2021.01.006)
12. Gromov A.A., Khabas T.A., Ilyin A.P., Popenko E.M., Korotkov A.G., Arkhipov V.A., Dietz A.A., Strokova Yu.I., Tolbanova L.O. Gorenje nanoporoshkov metallov [Metal nanopowders combustion]. Tomsk: Deltaplan, 2008 [in Russian].
13. Manin J., Skeen S.A., Pickett L.M. Performance comparison of state-of-the-art high-speed video cameras for scientific applications // *Optical Engineering*, Vol 57, I. 12, 2018, 124105 (doi: 10.1117/1.OE.57.12.124105)
14. Li L., Ilyin A.P., Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Klenovskii M.S., Study of self-propagating high-temperature synthesis of aluminium nitride using a laser monitor // *Ceramics International*, Vol. 44, № 16, 2018, (doi:10.1016/j.ceramint.2018.07.237)
15. Zepper E.T., Pantoya M.L., Bhattacharya S., Marston J.O., Neuber A.A., Heaps R.J. Peering through the flames: imaging techniques for reacting aluminum powders // *Applied Optics*, Vol. 56, 2017, pp. 2535-2541 (doi:10.1364/AO.56.002535)
16. Wang H., Kline D.J., Biswas P., Zachariah M.R. Connecting agglomeration and burn rate in a thermite reaction: Role of oxidizer morphology // *Combustion and Flame*, Vol. 231, 2021, 111492, (<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111492>)
17. Baranov P.S., Mantsvetov A.A., Belous D.A., Dmitrieva A.U. The designing of the television systems for registration high-rate processes // *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tehnika teledeniya* [Questions of radio electronics. Series: Television technology], №4, 2017, pp. 35-43 [in Russian].
18. Vision Research Inc. <https://www.phantomhighspeed.com/products> (Access date: 04/07/2024)
19. Gubarev F.A., Mostovshchikov A.V., Li L. Two-brightness-amplifier imaging system for energetic-materials-combustion study // *Optics and Laser Technology*, Vol. 159, 2023, 108981 (doi:10.1016/j.optlastec.2022.108981)
20. Burkin E.Y., Gubarev F.A., Sviridov V.V., Shiyanov D.V. Two-channel power supply for an imaging system with copper bromide vapor brightness amplifiers // *Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 19, № 3, 2023 (<https://doi.org/10.22068/IJEEE.19.3.2617>)

21. Petrash G.G. Opticheskie sistemy s usilitelyami yarkosti [Optical systems with brightness amplifiers]. M.: Nauka, 1991 [in Russian].
22. Evtushenko G.S. Methods and instruments for visual and optical diagnostics of objects and fast processes. Nova Science Publishers. New York, USA, 2018.
23. High-speed cameras EVERCAM, EVERCAM F, EVERCAM HR, EVERCAM HS, EVERCAM L, EVERCAM FL. User's Guide. Version 5.00. <https://evercam.ru/dokumentatsiya/> (Access date: 04/07/2024)
24. Pervikov A., Toropkov N., Kazantsev S., Bakina O.V., Glazkova E., Lerner M. Preparation of nano/micro bimodal aluminum powder by electrical explosion of wires // Materials, № 21, 2021 (doi:10.3390/ma14216602)
25. Toropkov, N.E., Sagun, A.I., Kudryashova, O.B., Lerner, M.I. Optimal Conditions for ultrasonic treatment of powder suspensions to obtain homogeneous thermite mixtures // Russian Physics Journal, Vol. 66, № 9, 2023, pp. 978-982 (doi: 10.1007/s11182-023-03032-w)
26. Petrovsky G.T. Czvetnoe opticheskoe steklo i osoby'e stekla [Color optical glass and special glasses]. M.: Dom Optiki, 1990 [in Russian].
27. Li L., Shiyanov D.V., Gubarev F.A. Spatial–temporal radiation distribution in a CuBr vapor brightness amplifier in a real laser monitor scheme // Applied Physics B: Lasers and Optics, Vol. 126, № 10, 2020, 155 (<https://link.springer.com/article/10.1007/s00340-020-07511-7>)