

## Скоростная видеосъемка и цифровая обработка изображений выхлопной струи модельного газогенератора на твердом топливе

© Д.А. Ягодников<sup>1</sup>, И.И. Хомяков<sup>1</sup>, А.С. Бурков<sup>1</sup>, А.В. Самородов<sup>1</sup>,  
О.А. Артюхова<sup>1</sup>, Л.С. Яновский<sup>2</sup>, Е.В. Суриков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

<sup>2</sup> Центральный институт авиационного моторостроения  
им. П.И. Баранова, Москва, 111116, Россия

*Рассмотрены вопросы разработки методики скоростной видеосъемки и цифровой обработки видеоизображений огневых испытаний модельного газогенератора на твердом топливе. Продемонстрирована возможность использования цифровой обработки большого потока видеoinформации для диагностики процессов горения и течения высокотемпературных двухфазных потоков. Разработаны методика градуировки по яркостной температуре светоизмерительной лампы уровня засветки ПЗС-матрицы видеокамеры и программное обеспечение для обработки, хранения и представления результатов визуализации. Проведены испытания модельного газогенератора на твердом топливе со скоростной видеосъемкой процесса истечения продуктов сгорания из двухсopлового блока. Представлены примеры обработки полутоновых изображений температурных полей, газодинамическая картина течения, иллюстрирующие полный цикл применения бесконтактного оптического метода диагностики от проведения испытания до получения количественных характеристик исследуемых температурных полей.*

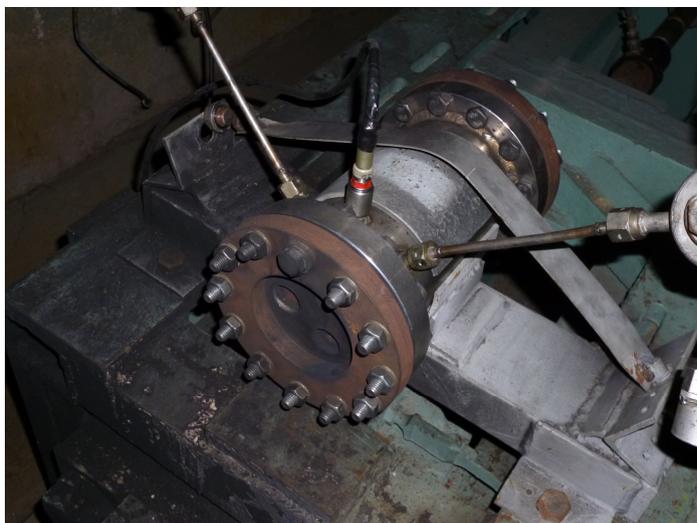
**Ключевые слова:** скоростная видеосъемка, твердое топливо, продукты сгорания, цифровая обработка изображений.

При создании газогенераторов на твердом топливе (например, для твердотопливных и ракетно-прямоточных двигателей) необходимо располагать информацией о поле течения рабочего тела как во внутрикамерном пространстве, так и за срезом сопла или выходного устройства. Современная цифровая видеотехника позволяет решить эту задачу с большей информативностью и меньшими временными затратами, чем применявшаяся в XX в. киноаппаратура. Помимо газодинамической картины течения большой практический интерес представляют температурные профили и температурные поля истекающей струи продуктов сгорания.

Цель исследования — разработка методики скоростной цифровой видеосъемки и цифровая обработка видеоизображений испытаний модельного газогенератора на твердом топливе.

Экспериментальные исследования проведены на модельной установке, состоящей из камеры сгорания газогенератора (объект испы-

тания), системы электровоспламенения образца топлива, системы измерения и регистрации давления и температуры в камере, а также системы визуализации рабочего процесса (рис. 1). В зависимости от цели испытания и вида топлива в сопловом блоке устанавливали сменные вкладные сопла, диаметр их минимальных сечений  $d_{кр} = 7 \dots 9$  мм.



**Рис. 1.** Общий вид модельного газогенератора

Во время эксперимента давление замеряли с помощью датчика типа МД-60. Подготовительные операции перед проведением испытаний включали сборку газогенератора, размещение внутри камеры сгорания образца топлива с воспламенителем, в качестве которого использовался дымный ружейный порох. Зажигание воспламенителя производилось за счет джоулева тепла, выделяющегося при подаче на токоведущие провода напряжения около 27 В.

Практическая реализация методов визуализации и оптической пирометрии осуществлена с использованием скоростной цифровой видеокамеры «ВидеоСпринт», предназначенной для регистрации быстропротекающих процессов с частотой 500...4 000 кадров/с. Основные характеристики видеокамеры приведены ниже:

Разрешение.....	1280×1024
Размер пиксела, мкм.....	12
Объем встроенной памяти, Гб.....	6
Максимальная скорость съемки, кадров/с .....	До 4000

Для достижения поставленной цели разработаны системы регистрации и обработки изображения, включающие в себя следующие аппаратные и программные составляющие:

- исследуемый объект (внутренний объем камеры сгорания, истекающая из сопла струя продуктов сгорания, эталонная температурная лампа и т. д.);

- видеокамеру, фиксирующую изображение и имеющую определенные программируемые цифровые эффекты и настройки (например, возможность регистрировать негативное изображение, устанавливать светофильтры, разрешать или отменять автоматическую установку фокуса и т. д.);

- систему хранения оцифрованного изображения на жестком диске персонального компьютера, к которому подключена видеокамера и на который загружено ее программное обеспечение;

- систему градуировки канала видеопирометрии, состоящую из светоизмерительной лампы типа СИ8-200У, на которую при постоянном напряжении подается ток, соответствующий фиксированному значению яркостной температуры вольфрамового тела накала лампы.

В качестве исследуемого объекта выбрана истекающая из сопла газогенератора струя продуктов сгорания твердого топлива, ее особенностью является интенсивное световое излучение, спектр которого аналогичен спектру серого тела. Яркости отдельных элементов фиксируемого изображения могут различаться на несколько порядков.

Для повышения качества визуального анализа процесса горения факела продуктов сгорания на основе последовательности видеоизображений, а также для автоматизированного численного анализа параметров этого процесса было разработано специальное программное обеспечение (СПО). Оно позволило добиться псевдоцветового преобразования полутоновых черно-белых и цветных видеоизображений и обеспечило решение следующих задач:

- загрузка и покадровый просмотр видео в градациях серого;
- псевдоцветовое кодирование видео в покадровом режиме;
- выделение области «интереса» на изображении для псевдоцветового кодирования, выбор увеличения для покадрового просмотра видео;

- просмотр результатов псевдоцветового кодирования и исходного видео в покадровом режиме в главном окне СПО (рис. 2);

- загрузка градуировочной кривой;
- формирование цветовой палитры для псевдоцветового кодирования изображений, сохранение цветовой шкалы, ввод сохраненной ранее цветовой шкалы;

- автоматическое задание параметров цветového клина с учетом введенной градуировочной кривой, возможность коррекции параметров цветového клина (число цветов, граничные значения температур для каждого цвета) оператором;

- сохранение изображения текущего кадра в псевдоцвете с учетом выбранного пользователем увеличения, сохранение изображения цветового клина.

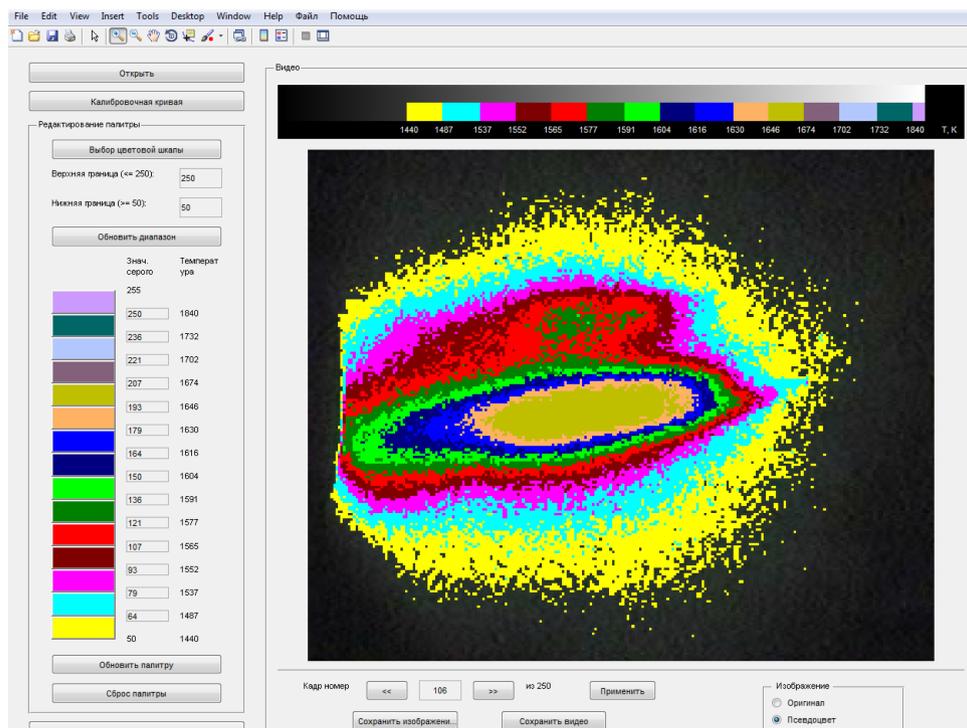
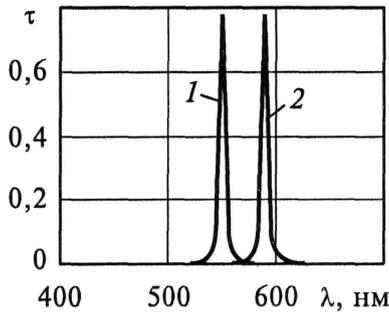


Рис. 2. Главное окно СПО

Из числа пирометрических методов наибольшее распространение в настоящее время получили методы яркостной и цветовой пирометрии. При исследовании оптически непрозрачных факелов, характерных для продуктов сгорания твердых топлив, наиболее подходящим является метод яркостной пирометрии. Суть его заключается в измерении на фиксированной длине волны  $\lambda_{\max}$  интенсивности излучения объекта, которая пропорциональна яркости и зависит от абсолютной температуры излучающего тела.

Измерение яркостной температуры по монохроматической яркости осуществляется с помощью интерференционного светофильтра, выделяющего из видимого спектрального диапазона узкий участок длин волн (рис. 3). Отметим, что градуировка оптического канала выполняется посредством видеосъемки тела накала светоизмерительной лампы через тот же интерференционный светофильтр, который использовался при видеосъемке исследуемого факела продуктов сгорания.

Для определения истинной температуры  $T$  продуктов сгорания по яркостной температуре  $T_y$  необходимо знать монохроматический ко-



**Рис. 3.** Типовые спектральные характеристики интерференционных светофильтров:

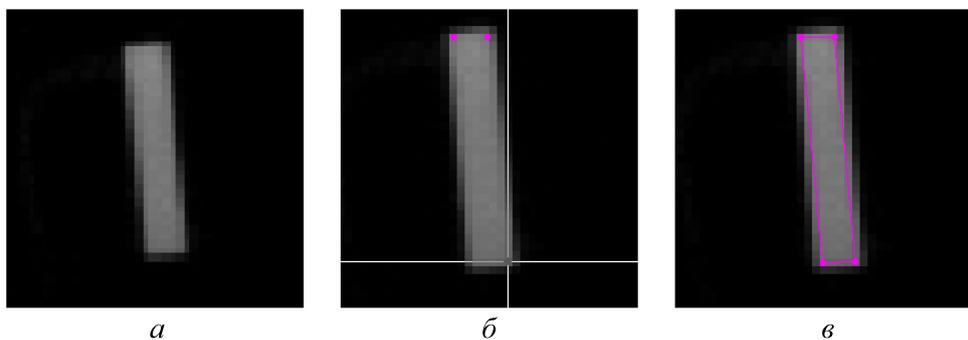
$$1 — \lambda_{\max} = 550 \text{ нм}; 2 — \lambda_{\max} = 589,5 \text{ нм}$$

эффицент излучательной способности  $\varepsilon_k$   $k$ -фазы продуктов сгорания твердого топлива на длине волны  $\lambda_{\max}$ , соответствующей максимуму пропускания интерференционного светофильтра. Тогда связь истинной температуры горения и измеренной яркостной температуры выражается соотношением [1]

$$T = \left[ \frac{1}{T_j} + \lambda_{\max} \frac{\ln \varepsilon_k(\lambda_{\max}, T)}{C_2} \right]^{-1},$$

где  $C_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$  м·К — постоянная излучения;  $\varepsilon_k(\lambda_{\max}, T)$  — монохроматический коэффициент излучательной способности конденсированных продуктов сгорания твердого топлива на длине волны  $\lambda_{\max}$ . Известно, что для твердого топлива с добавками металлического горючего (например, алюминия), а также для гидрореагирующих твердых топлив характерен серый спектр излучения, обусловленный наличием в продуктах сгорания оксидов алюминия или магния, для которых значение  $\varepsilon_k(\lambda_{\max}, T)$  в видимом диапазоне спектра практически не отличается от единицы [2, 3]. В связи с этим можно сделать вывод, что значения яркостных температур, полученные по формуле, близки к истинным.

Для выполнения градуировки оптического канала дополнительно разработано программное обеспечение, позволяющее обрабатывать изображение тела накала светоизмерительной лампы СИ8-200У. Так как в ходе записи последовательности видеоизображений положение камеры относительно лампы не изменяется, область «интереса», соответствующая изображению нити накаливания лампы, выделялась на наиболее ярком изображении (рис. 4). Найденные таким образом координаты области «интереса» использовались для обработки всех видеопоследовательностей.



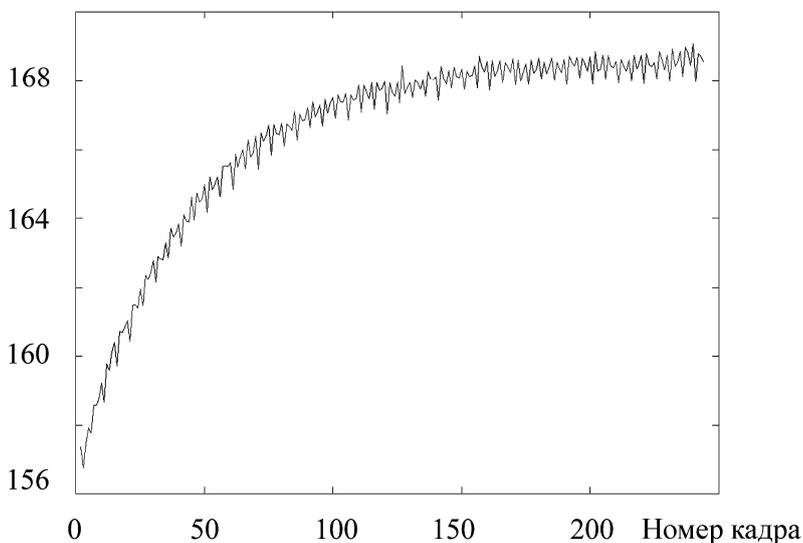
**Рис. 4.** Этапы построения маски для области «интереса»:

*a* — фрагмент исходного изображения тела накала светоизмерительной лампы;  
*б* — выделение угловых точек области; *в* — результат выделения области

Для каждого значения тока, т. е. для каждой видеопоследовательности, было рассчитано среднее значение уровней серого в области эталонной лампы в каждом кадре и построена зависимость среднего значения уровней серого от номера кадра (рис. 5). Затем на горизонтальном участке зависимости (начиная примерно со 150-го кадра) вычислялись общее среднее значение и среднеквадратическое отклонение.

На основе анализа метрологических возможностей оптико-электронной системы обработки изображений был проведен экспе-

Уровень серого



**Рис. 5.** Зависимость значения уровней серого от номера кадра для тока силой 21 А

римент по определению соответствия уровней серого значениям яркостной температуры тела накала лампы типа СИ8-200У, задаваемой конкретным значением тока в цепи. На рис. 6 представлена градуировочная зависимость уровней серого видеоизображения эталонной лампы от яркостной температуры вольфрамового тела накала при фиксированных условиях записи видеопоследовательностей.

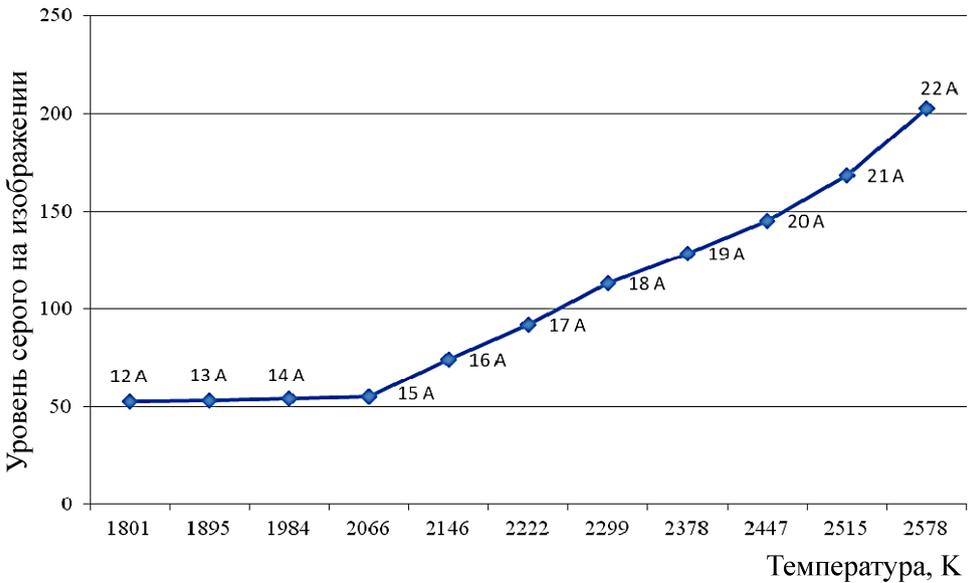


Рис. 6. Градуировочные характеристики эталонной лампы

Полученные данные свидетельствуют о том, что оптимальным является диапазон значений яркостной температуры 2000...2500 К, поскольку в нем реализуется близкая к линейной зависимость. Для расширения линейного участка до более высоких температур может быть использован принцип пирометрического редуцирования излучения с помощью нейтральных светофильтров.

В процессе псевдоцветового преобразования полутоновых черно-белых или цветных изображений формирование пользовательской палитры в СПО осуществляется либо последовательным выбором всех цветов палитры, либо модификацией загружаемых стандартных или пользовательских палитр (рис. 7). Имеется возможность после создания палитры сохранить файл палитры для последующего применения.

С помощью полученной градуировочной характеристики и палитры цветов формируют черно-белый и цветной градуировочный клинья (рис. 8); цифры обозначают границы на шкале серого, по которым задается цвет.

Число цветов на шкале и их палитра определяются экспериментально оператором в зависимости от оптимального сочетания и информативности получаемого псевдоцветового изображения.

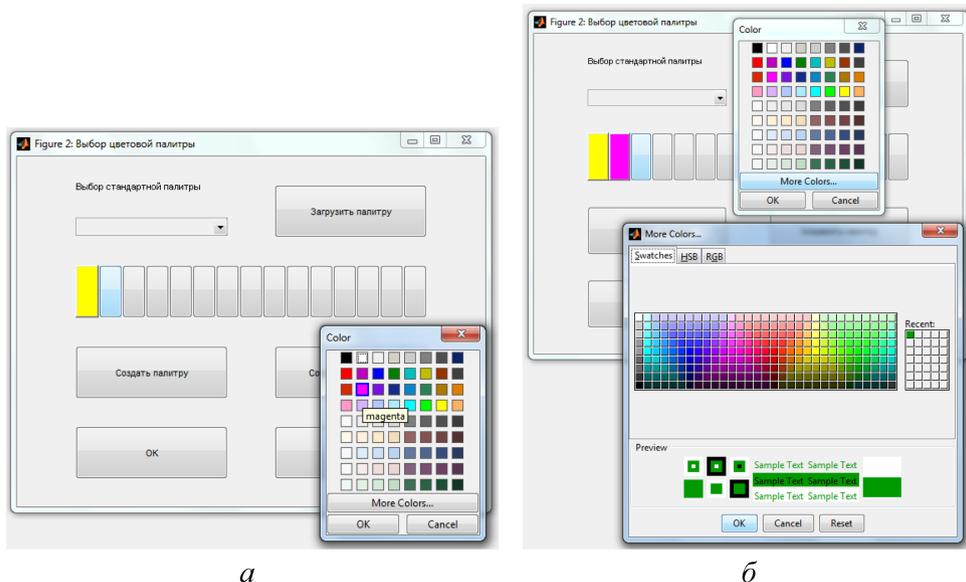


Рис. 7. Окна формирования пользовательской палитры из стандартного набора цветов (а) и из расширенной палитры (б)

0 63 73 95 111 127 143 159 175 191 207 223 239 255



Рис. 8. Градуировочные черно-белый и цветной клинья

При проведении огневых испытаний основными регистрируемыми внутрибаллистическими характеристиками являлись тяга газогенератора и давление в камере сгорания. Осциллограмма изменения тяги  $R$  и давления в газогенераторе  $p_k$  во времени (рис. 9) свидетельствует о незначительном монотонном увеличении давления в камере сгорания, что можно объяснить зашлаковкой минимальных сечений сопел (начальный диаметр 7 мм), подтверждаемой их визуальным осмотром после эксперимента.

Рассмотрим примеры обработки видеоизображений пусков и результаты пирометрической диагностики, выполненной в соответствии с разработанной методикой.

На первом этапе для определения оптимальных режимов, дистанции и ракурсов видеосъемка осуществлялась на аналоговую видеокамеру Panasonic со стандартной частотой съемки 25 кадров/с через интерференционный светофильтр, имеющий максимум пропускания в зеленой области спектра ( $\lambda_{\max} = 550$  нм). Пример обработанных кадров видеоизображений истечения продуктов сгорания из сопла модельного газогенератора в режиме наложения псевдоцветового изображения на черно-белое приведен на рис. 10.

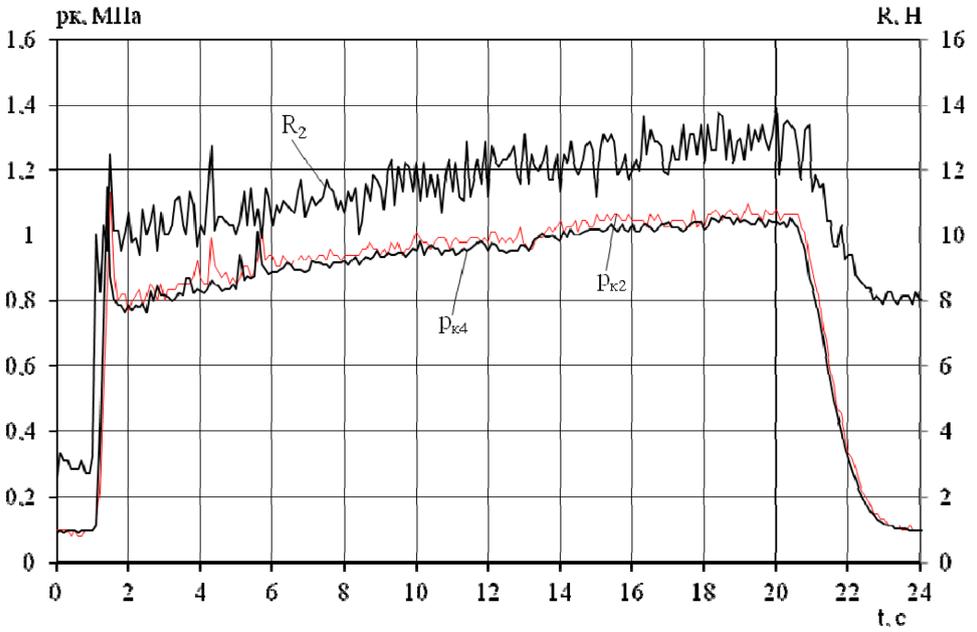


Рис. 9. Осциллограмма испытания

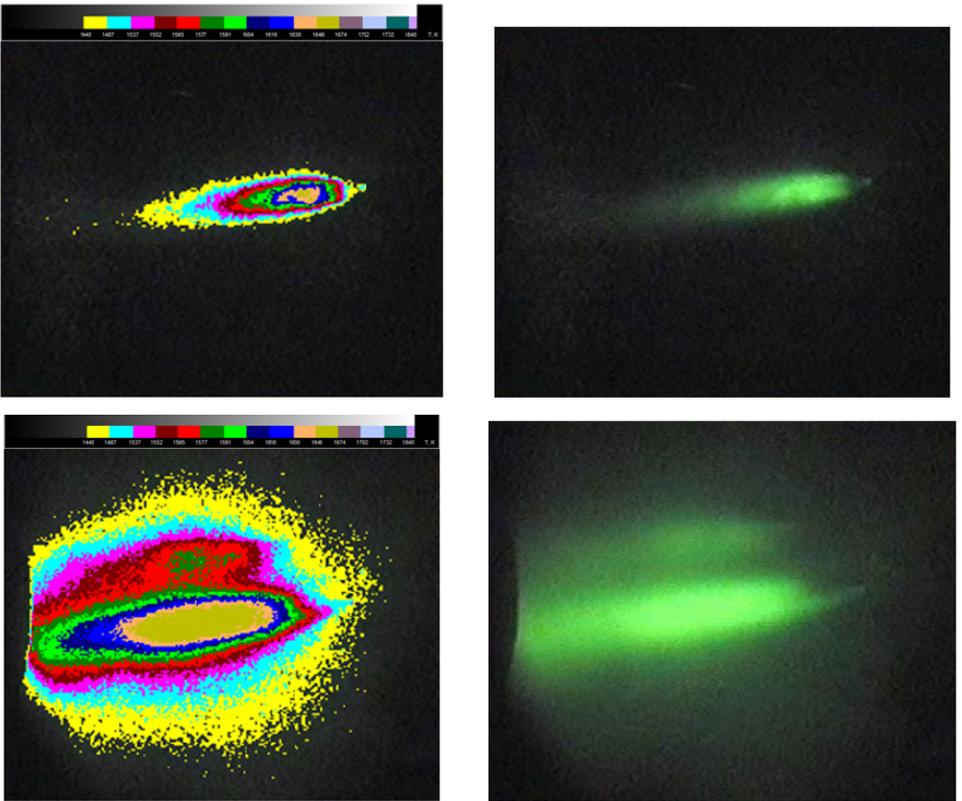


Рис. 10. Видеосъемка аналоговой камерой

Анализ видеоизображений испытания и их цифровая обработка свидетельствуют о наличии ярко выраженного ядра потока у каждой струи продуктов сгорания, истекающей из двухсоплового блока, границы потока размыты, вихревые структуры не наблюдаются.

Затем проводилась видеосъемка на скоростную цифровую видеокамеру «ВидеоСпринт» при следующих параметрах: частота видеосъемки 500 кадров/с; экспозиция кадра 2 мкс; разрешение 1280×500.

На рис. 11 приведен пример обработки исходного черно-белого кадра, представляющего истечение продуктов сгорания из соплового блока модельного газогенератора, в режиме наложения псевдоцветового изображения на черно-белое.

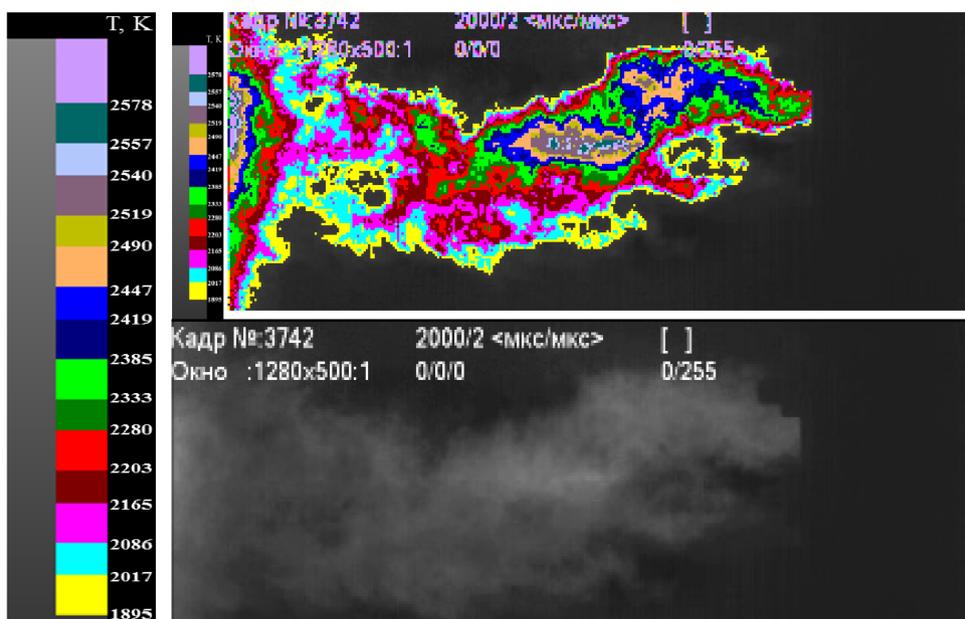


Рис. 11. Обработка видеоизображений

На изображениях видимый спектр излучения разделен на зоны, которые обусловлены выбранным диапазоном температур и информативностью изображения. В этих зонах определены яркостная температура потока, а также площадь представляющего интерес участка (как абсолютная, так и относительно площади всего потока по продольному сечению).

Результаты оптико-электронной обработки изображений позволяют сделать следующие выводы.

1. *Используемое оборудование.* Сравнительный анализ видеоклад-ров, полученных с помощью скоростной («ВидеоСпринт») и аналоговой (Panasonic) видеокамер свидетельствует об очень узком диапазоне чувствительности ПЗС-матрицы камеры Panasonic, на котором

реализуется линейная зависимость уровня яркости (серого) от яркостной температуры тела накала светоизмерительной лампы. Это приводит к ограничению возможности применения оптической пиromетрии и, как следствие, к засветке ПЗС-матрицы. Сужение диапазона чувствительности происходит также вследствие автоматической регулировки (подстройки) видеокамеры Panasonic по яркости объекта, когда излучение относительно холодных источников регистрируется как более яркое.

Увеличение частоты съемки до 500 кадров/с при использовании камеры «ВидеоСпринт» привело к регистрации вихревых структур на границе струи продуктов сгорания, в то время как при съемке камерой Panasonic (частота съемки 25 кадров/с) граница затопленной струи представляется гладкой.

2. *Результаты измерений температур.* Наибольшие значения температур находятся в диапазоне 2400...2500 К, что свидетельствует о догорании в воздухе продуктов сгорания твердого топлива, истекающих из модельного газогенератора в окружающее пространство, а также о постепенном выравнивании профиля температур на расстоянии, попадающем в поле зрения видеокамеры (около 400 мм).

Таким образом, в результате исследований разработаны методики видеопирометрической диагностики и специальное программное обеспечение для оптико-электронной обработки изображений процессов истечения высокотемпературных двухфазных продуктов сгорания твердых топлив применительно к модельным камерам сгорания, а также продемонстрированы принципиально новые возможности визуализации с использованием скоростной цифровой видеокамеры.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ягодников Д.А. *Воспламенение и горение порошкообразных металлов.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2009, 432 с.
- [2] Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Я. *Основные характеристики горения.* Москва, Химия, 1977, 320 с.
- [3] Ягодников Д.А., Воронежский А.В., Лапицкий В.И. Распространение пламени по аэрозвеси алюминия при пониженных давлениях. *Физика горения и взрыва*, 1995, т. 31, № 5, с. 23–31.

Статья поступила в редакцию 15.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Д.А. Ягодников, И.И. Хомяков, А.С. Бурков, А.В. Самородов, О.А. Артюхова, Л.С. Яновский, Е.В. Суриков. Скоростная видеосъемка и цифровая обработка изображений выхлопной струи модельного газогенератора на твердом топливе. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 4.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/709.html>

**Ягодников Дмитрий Алексеевич** родился в 1961 г.; окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1984 г.; д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 180 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований рабочих процессов и разработки бесконтактных методов диагностики ракетных и реактивных двигателей.

**Хомяков Илья Игоревич** окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2005 г.; соискатель кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана; главный конструктор направления корпорации «Тактическое ракетное вооружение»; специалист в области проектирования и отработки реактивных двигателей.

**Бурков Андрей Сергеевич** окончил Московский авиационный институт в 2010 г.; инженер НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана; аспирант кафедры «Ракетные двигатели»; специалист в области стендовой отработки ракетных и реактивных двигателей.

**Самородов Андрей Владимирович** родился в 1975 г.; окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1999 г.; канд. техн. наук; начальник отдела НИИЦ биометрической технологии МГТУ им. Н.Э. Баумана; доцент кафедры «Биомедицинские технические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана; автор более 100 научных работ в области распознавания образцов и принятия решений, оптико-цифровых систем автоматизированной обработки медико-биологических изображений. e-mail: avs@bmstu.ru

**Артюхова Ольга Александровна** родилась в 1986 г.; окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2009 г.; ассистент кафедры «Биомедицинские технические системы»; научный сотрудник НИИЦ биомедицинской технологии МГТУ им. Н.Э. Баумана; лауреат стипендии Президента РФ по приоритетным направлениям развития науки и техники; автор более 30 научных работ в области автоматизации анализа медико-биологических препаратов и обработки изображений. e-mail: artyukhova@bmstu.ru

**Яновский Леонид Самойлович** родился в 1948 г.; д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; начальник отдела ЦИАМ им. П.И. Баранова; крупный ведущий ученый в области химмотологии и теплофизики авиационных топлив, смазочных материалов и спецжидкостей; автор более 300 научных публикаций.

**Суриков Евгений Валентинович** – канд. техн. наук, начальник сектора ЦИАМ им. П.И. Баранова; специалист в области стендовой отработки ракетных и реактивных двигателей.