

УДК 629.7.03

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПИРОТЕХНИЧЕСКОГО СОСТАВА ИЗ МОДЕЛЬНОГО ГАЗОГЕНЕРАТОРА

Д.А. Ягодников, И.И. Хомяков, А.С. Бурков, О.А. Артюхова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация
e-mail: daj@bmsu.ru; abs2186@mail.ru; artyukhova@bmsu.ru

Проведены экспериментальные исследования с помощью визуализации процесса истечения из двухсоплового блока модельного газогенератора продуктов сгорания твердого пиротехнического состава. Описаны методики градуировки степени засветки (уровень серого) матрицы видеокамеры "Видеоспринт" по яркостной температуре вольфрамового тела накала эталонной лампы СИ8-200, псевдоцветового кодирования изображений, задания параметров цветового клина с учетом введенной градуировочной кривой. Приведены примеры псевдоцветовой обработки кадра истекающей струи продуктов сгорания в процессе огневого испытания и поля температур с наибольшими значениями в диапазоне 2400... 2500 К. Установлено, что применение скоростной цифровой видеокамеры с частотой съемки 500 кадр/с привело к регистрации вихревых структур на границе струи продуктов сгорания, в отличие от видеосъемки камерой Panasonic (частота 25 кадр/с), когда граница затопленной струи представляется гладкой.

Ключевые слова: скоростная видеосъемка, пиротехника, факел, продукты сгорания, цифровая обработка изображений, оптическая пирометрия.

VISUALIZATION AND IMAGE ANALYSIS OF OUTFLOW OF COMBUSTION PRODUCTS OF PYROTECHNIC COMPOSITION FROM THE MODEL GASGENERATOR

D.A. Yagodnikov, I.I. Khomyakov, A.S. Burkov, O.A. Artyukhova

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation
e-mail: daj@bmsu.ru; abs2186@mail.ru; artyukhova@bmsu.ru

Using the visualization, experimental studies of outflow of combustion products of solid pyrotechnic composition from a two-nozzle unit of the model gasgenerator are conducted. The methods are described: for calibrating the exposure degree (gray level) of the Videosprint matrix camcorder according to the brightness temperature of the tungsten filament of the standard lamp SI8-200; for pseudo-color coding of images; for configuring the color wedge taking into account the introduced calibration curve. The examples of pseudo-color processing of a frame of the outflowing stream of combustion products in the fire test and the temperature field with the highest values in the range 2400–2500 K are given. It is found that the use of high-speed digital video camera with a frequency of shooting of 500 frames/s resulted in registration of vortex structures on a border of the stream of combustion products, unlike video shooting by the Panasonic camera (a frequency of 25 frames/s), when a border of the submerged stream appears smooth.

Keywords: high-speed video shooting, pyrotechnics, torch, combustion products, digital image processing, optical pyrometry.

Одно из направлений создания перспективных двигательных установок на твердых пиротехнических составах (ТПС) связано с разработкой надежных и высокоэффективных методов и средств диагностики, необходимых для реализации их наилучших технических характеристик при наименьших экономических затратах. Традиционные методы исследования характеристик рабочего процесса в камерах сгорания (КС) не всегда эффективны, особенно в случае необходимости диагностики в объеме КС. В целях устранения указанных недостатков в последнее время разрабатываются нетрадиционные методы диагностики, основанные, например на акустооптических методах диагностики рабочего процесса [1–5].

Оптимизация параметров рабочего процесса в ракетных двигателях возможна только на основе изучения закономерностей всех стадий внутрикамерных процессов. Это требует использования специальных методов диагностики, обладающих высокой информативностью и позволяющих регистрировать достаточно большое число параметров. При измерении температуры системы, в которой протекают интенсивные химические реакции, используют два принципиально различных метода [6, 7]: зондовую и радиационную пирометрию. В условиях одно- и двухфазных потоков термопарное зондирование имеет целый ряд недостатков. Прежде всего, являясь контактным методом определения температуры, зонд вносит нежелательное воздействие на исследуемую систему. Обусловленные термопарой возмущения обычно бывают аэродинамического, термического и химического характера. Влияние термопары может быть снижено путем уменьшения размера спая. Но одновременно с этим снижается термостойкость зонда в высокотемпературных потоках и уменьшается область, которую зондирует термопара. Необходимо подчеркнуть, что с помощью этого метода регистрируют локальную температуру в объеме, пропорциональном примерно десяти диаметрам спая, и для получения поля температур исследуемого объекта необходимо использовать гребенку термопар. Кроме того, при исследовании двухфазного потока на термопару оседают конденсированные частицы продуктов сгорания, вызывая дополнительные погрешности измерений, связанные с возникновением паразитных термо-ЭДС в местах контакта частиц k -фазы и спая.

Эти соображения предопределили в последнее время интенсивную разработку методов визуализации и оптической пирометрии, заключающихся в регистрации электромагнитного излучения продуктов сгорания в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной частях спектра. С помощью радиационных методов топливной смеси измеряют температуру объекта, находящегося в поле регистрации измерительной системы.

При визуализации процессов горения измеряемыми параметрами являются временные характеристики: время задержки воспламенения, время горения и др. Кроме того, можно измерять температуру горящих частиц по интенсивности почернения трека на кинокадре или видеоизображении.

В целях получения количественной информации при пирометрическом исследовании предлагается использовать методику оптико-электронной обработки оптической информации [8], заключающуюся в преобразовании видеосигнала в кодовый эквивалент. Наличие в измерительной цепи аналого-цифровых сигналов облегчает их ввод в ЭВМ. Следует отметить, что в последнее время различные фирмы разрабатывают пакеты прикладных программ обработки изображений, реализуемых на персональных ЭВМ, позволяющих получать количественную и качественную информации, а также осуществлять ее архивирование и хранение. Кроме того, внедряемая в арсенал экспериментаторов цифровая видеотехника, высокопроизводительные компьютеры дают возможность реализовать в наибольшей степени преимущества оптических методов диагностики.

В связи с изложенным целью настоящей работы являются визуализация и пирометрические исследования процесса истечения продуктов сгорания пиротехнического состава из двухсоплового модельного газогенератора (ГГ).

Экспериментальные исследования проведены на модельном ГГ, состоящем из КС (объекта испытания), систем электровоспламенения образца ТПС и регистрации давления и температуры в камере (системы измерения и регистрации), а также системы визуализации рабочего процесса.

Внешний вид модельного ГГ показан на рис. 1. Во время эксперимента замер давления проводится с помощью потенциометрического датчика типа МД-60. Подготовительные операции перед проведением испытания начинаются со сборки газогенератора, включая размещение внутри камеры сгорания образца ТПС с воспламенителем, в качестве которого используется дымный ружейный порох. Зажигание воспламенителя проводилось за счет джоулевой теплоты, выделяющейся при подаче на токоведущие провода напряжения ~ 27 В.



Рис. 1. Общий вид соплового блока модельного газогенератора

Система регистрации и обработки изображения включает в себя аппаратные и программные составляющие:

- исследуемый объект (внутренний объем КС, истекающая из сопла струя продуктов сгорания, образцовая температурная лампа и т.д.);
- видеокамеру, фиксирующую изображение и имеющую определенные программируемые цифровые эффекты и настройки. Например, можно регистрировать негативное изображение, устанавливать светофильтры, разрешать или отменять автоматическую установку фокуса и т.д.

Исследуемый объект в настоящей работе — истекающая из сопла струя продуктов сгорания ТПС. Особенностью является световое излучение объекта, спектр которого аналогичен спектру серого тела. При этом яркости отдельных элементов фиксируемого изображения могут отличаться на несколько порядков.

Практическая реализация методов визуализации и оптической пирометрии осуществлена с использованием скоростной цифровой видеокамеры “Видео Спринт”, предназначенной для регистрации быстротекущих процессов с частотой от 500 до 50000 кадров/с. Для определения зависимости между степенью засветки матрицы видеокамеры (уровень серого) и температуры светящегося объекта (факел ПС) была проведена видеосъемка эталонной лампы СИ8-200 с известной зависимостью яркостной температуры вольфрамового тела накала от силы тока в цепи лампы. Для каждого значения тока снималась видеопоследовательность в 244 кадра.

Для проведения расчетов было написано специализированное программное обеспечение (СПО). Поскольку в ходе записи видеопоследовательностей положение камеры относительно лампы не менялось, область “интереса”, соответствующая изображению прямоугольного тела накаливания лампы, выделялась на наиболее ярком изображении. Найденные таким образом координаты области “интереса” использовались для обработки всех видеопоследовательностей.

Для каждого значения тока, т.е. для каждой видеопоследовательности, был выполнен расчет среднего значения уровней серого в области эталонной лампы в каждом кадре и построена зависимость среднего значения уровней серого от номера кадра, на основании которой на горизонтальном участке зависимости (с 150 кадра) вычислялось общее среднее значение и среднеквадратическое отклонение. Пример результатов обработки приведен в таблице, из которой следует, что оптимальным является диапазон яркостных температур 2000. . . 2500 К, поскольку при этом реализуется линейная зависимость параметров. Для расширения линейного участка до более высоких температур следует использовать принцип пирометрического редуцирования излучения при помощи нейтральных светофильтров.

Результаты расчетов зависимости уровней серого на изображении от тока в цепи лампы

Ток, А	Яркостная температура, К	Среднее значение уровней серого	Среднеквадратическое отклонение значений уровня серого
12	1444	52,7	0,07
13	1576	53,5	0,08
14	1695	54,2	0,08
15	1801	55,1	0,07
16	1895	74,4	0,13
17	1984	92,1	0,15
18	2066	113,5	0,18
19	2146	128,7	0,24
20	2222	145,3	0,25
21	2299	168,4	0,31
22	2378	202,5	0,44

Результатом градуировки по описанной методике являются зависимости уровней серого на изображении от температуры лампы при фиксированных условиях записи видеопоследовательностей, а также диапазон уровней яркости, в котором возможно измерение температуры по изображению в этих условиях.

Для повышения качества визуального анализа видеопоследовательностей процесса истечения ПС, а также обеспечения возможности автоматизированного численного анализа параметров факела, было разработано специальное программное обеспечение для псевдоцветового кодирования видеоизображений, которое обеспечивает решение следующих задач:

- загрузка калибровочной кривой;
- формирование цветовой палитры для псевдоцветового кодирования изображений, сохранение цветовой шкалы, ввод сохраненной ранее цветовой шкалы;
- автоматическое задание параметров цветового клина с учетом введенной градуировочной кривой с возможностью коррекции параметров цветового клина (число цветов, граничные значения температур для каждого цвета) оператором;
- 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;

— сохранение изображения текущего кадра в псевдоцвете с учетом выбранного пользователем увеличения, сохранение изображения цветового клина;

— сохранение видео с результатом псевдоцветового кодирования с учетом выбранного пользователем увеличения.

Специализированное программное обеспечение позволяет загружать видеофайлы с расширением *.wmv, *.avi, *.mpg. Для ввода калибровочной кривой осуществляется загрузка таблицы Excel с предварительно рассчитанными данными о зависимости среднего уровня серого от температуры, после чего проводится интерполяция.

Цветовую палитру для псевдоцветового кодирования изображений выбирают из набора стандартных или ранее созданных и сохраненных пользователем палитр или формируют новую. Пользовательская палитра формируется либо последовательным выбором всех цветов палитры, либо модификацией загружаемых стандартных или пользовательских палитр. После создания палитры имеется возможность сохранить файл палитры для последующего использования.

Экспериментальные исследования проводились на образцах ТПС, изготовленных в виде торцевых зарядов, бронированных по одному из торцов и наружной цилиндрической поверхности. Диаметр заряда составляет 88 мм, по бронировке 96 мм.

Пример обработанного отдельного кадра (нижнее изображение) испытания модельного газогенератора в режиме наложения псевдоцветового на черно-белое изображение приведен на рис. 2 (верхнее изображение).

На данных изображениях весь видимый спектр излучения разделен на зоны, которые определяются выбранным диапазоном температур и информативностью изображения. По этим зонам можно определить яркостную температуру потока, а также площадь интересующего участка как абсолютную величину, так и относительно к площади всего потока по продольному сечению.

Для сравнения на рис. 3 показан отдельный кадр и его обработка, полученные с использованием аналоговой видеокамеры Panasonic, проводившей видеосъемку с частотой 25 кадр/с. Характерной особенностью данных изображений является большая засветка ПЗС-матрицы, обусловленная большим временем экспозиции изображений, которая для данной видеокамеры обратно пропорциональна частоте съемки.

Приведенные результаты оптико-электронной обработки изображений позволяют сделать следующие выводы.

1. Сравнительный анализ видеок кадров, полученных с помощью скоростной (Видео Спринт) и аналоговой (Panasonic) кинокамер, свидетельствует об очень узком диапазоне чувствительности ПЗС-матрицы последней, на котором реализуется линейная зависимость

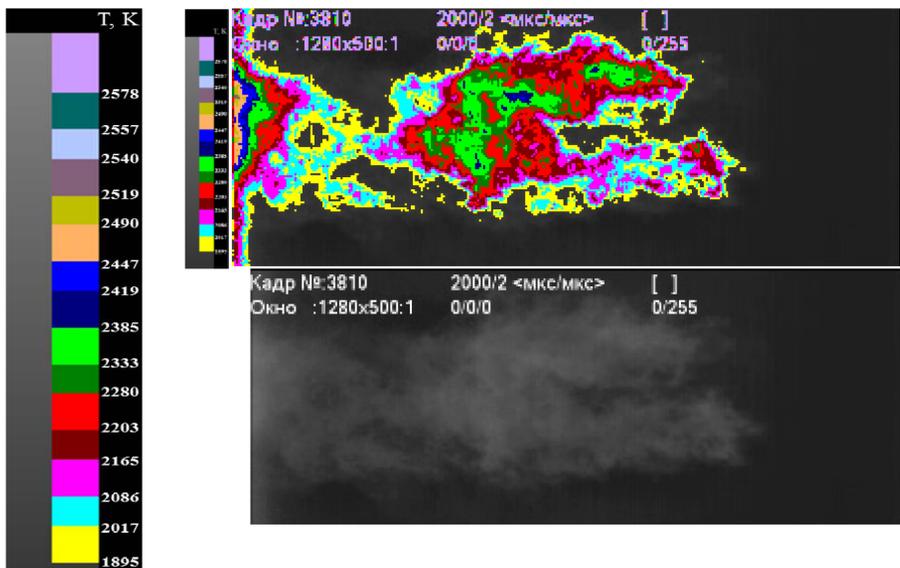


Рис. 2. Обработка видеоизображений испытания газогенератора на твердом топливе



Рис. 3. Видеосъемка аналоговой камерой

уровня яркости (серого) от яркостной температуры тела накала светоизмерительной лампы. В свою очередь, это приводит к ограничению возможности оптической пирометрии и, как следствие, засветки ПЗС-матрицы (см. рис. 3). Это происходит также вследствие автоматической регулировки (подстройки) телекамеры Panasonic по яркости объекта, когда даже излучение относительно холодных источников регистрируется более ярким.

2. Увеличение частоты съемки до 500 кадр/с привело к регистрации вихревых структур на границе струи продуктов сгорания в отличие от видеосъемки камерой Panasonic (частота 25 кадр/с), когда граница затопленной струи представляется гладкой.

3. Наибольшие значения температур находятся в диапазоне 2400. . . . 2500 К, что свидетельствует о догорании в воздухе продуктов горения ТПС, истекающих из модельного ГГ в окружающее пространство, а также о постепенном выравнивании профиля температур на расстоянии, попадающем в поле зрения видеокамеры (~ 400 мм).

ЛИТЕРАТУРА

1. Мазур М.М., Шорин В.Н., Жогун В.Н., Пустовойт В.И. и др. Акустооптический рамановский спектрометр // Акустооптические, акустические и рентгеноспектральные методы и средства измерений в науке и технике. ВНИИФТРИ. 2005. С. 16–26.
2. Bobrov A.N., Yagodnikov D.A., Popov I.V. Ignition and combustion in two-component powder suspension in a gas // *Combustion, explosion and shock waves*. 1992. Vol. 28. No. 2. P. 155–158.
3. Ягодников Д.А., Воронцовский А.В., Лапицкий В.И. Распространение пламени по аэрозвеси алюминия при пониженных давлениях // *Физика горения и взрыва*. 1995. Т. 31. № 5. С. 23–31.
4. Yagodnikov D.A., Voronetskii A.V. The Effect of Electric Field on Ignition and Combustion Processes of Combustible Cases, Dust and Liquids // *Combustion, Detonation, Shock Waves*. М.: Semenov Institute of Chemical Physics, 1994. Vol. 2. P. 87–90.
5. Теплинский М.В., Ягодников Д.А. Цифровая обработка и анализ визуализации результатов огневых испытаний модельного ракетного двигателя на твердом топливе // *Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение*. 2005. № 3. С. 34–41.
6. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Я. Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977. 320 с.
7. Кадышевич А.Е. Измерение температуры пламени. М.: Metallurgizdat, 1961. 218 с.
8. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 432 с.

REFERENCES

- [1] M.M. Mazur, V.N. Shorin, V.N. Zhogun, V.I. Pustovoyt, V.E. Pozhar, Yu.K. Kalinikov, N.S. Kostin, L.I. Mazur, V.N. Toropov, D.V. Shorin. Akustoopticheskiy ramanovskiy spektrometr. V kn.: “Akustoopticheskie, akusticheskie i rentgenospektral’nye metody i sredstva izmereniy v nauke i tekhnike” [Acousto-optical Raman spectrometer. In book: “Acousto-optical, acoustic and X-ray methods and means of measurement in science and technology”], Moscow, VNIIFTRI Publ., 2005, pp. 16–26.
- [2] Bobrov A.N., Yagodnikov D.A., Popov I.V. Ignition and combustion in two-component powder suspension in a gas. *Combustion, explosion and shock waves*, 1992, vol. 28, no. 2, pp. 155–158.
- [3] Yagodnikov D.A., Voronetskiy A.V., Lapitskiy V.I. Flame propagation for aerosuspension of aluminum at low pressures *Fizika goreniya i vzryva* [Combustion, explosion and shock waves], 1995, vol. 31, no. 5, pp. 23–31 (in Russ.).
- [4] Yagodnikov D.A., Voronetskii A.V. The Effect of Electric Field on Ignition and Combustion Processes of Combustible Cases, Dust and Liquids. *Combustion, Explosion, Shock Waves*, 1994, vol. 2, pp. 87–90.
- [5] Teplinskiy M.V., Yagodnikov D.A. Digital processing and analysis of visualization results of fire tests of a model solid-fuel rocket engine. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N. E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2005, no. 3, pp. 34–41 (in Russ.).
- [6] Mal’tsev V.M., Mal’tsev M.I., Kashporov L.Ya. Osnovnye kharakteristiki goreniya [Basic characteristics of combustion]. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 320 p.
- [7] Kadyshevich A.E. Measuring the temperature of the flame. Moscow, Metallurgy Publ., 1961. 218 p.
- [8] Yagodnikov D.A. Vosplamnenie i gorenje poroshkoobraznykh metallov [Ignition and combustion of powdered metals]. Moscow, MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2009. 432 p.

Статья поступила в редакцию 18.03.2014

Ягодников Дмитрий Алексеевич — 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. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

D.A. Yagodnikov — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 180 publications in the field of experimental and theoretical investigations of working processes and development of contactless methods of diagnostics of rocket and jet engines.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Хомяков Илья Игоревич — соискатель кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Главный конструктор направления “ОАО “Корпорация “Тактическое ракетное вооружение”. Специалист в области проектирования и отработки реактивных двигателей.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

I.I. Khomyakov — applicant for academic degree of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Chief designer in trend at OAO Corporation “Tactical Missile Weapons”. Specializes in design and development of jet engines.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Бурков Андрей Сергеевич — инженер НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области стендовой отработки ракетных и реактивных двигателей.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

A.S. Burkov — engineer of the Research Institute for Power Machine Building of the Bauman Moscow State Technical University. Post-graduate of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of bench testing of rocket and jet engines.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Артюхова Ольга Александровна — канд. техн. наук, ассистент кафедры “Биомедицинские технические системы”, научный сотрудник НИИЦ БТ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области автоматизации анализа медико-биологических препаратов и обработки изображений.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

O.A. Artyukhova — Cand. Sci. (Eng.), assistant lecturer of “Biomedical Technical Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University, researcher of the Research and Test Center of Biometric Technology at the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 30 publications in the field of automation of analysis of medical and biological specimens and image processing.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.