

Спектрональная диагностика процессов горения порошкообразного алюминия в воздушном потоке

© А.С. Бурков, Д.А. Ягодников, А.В. Сухов, В.И. Томак

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

При разработке прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) часто возникает задача оптимизации конструкции модельного двигателя. Оптимизация заключается в повышении качества рабочего процесса горения топлива в камере сгорания, критерием оценки которого может быть температура продуктов сгорания (ПС): ее значение и распределение по объему камеры. Измерение температуры двухфазного потока ПС связано с определенными трудностями, так как использование контактных методов не дает достоверной информации о температуре из-за воздействия на чувствительный элемент конденсированной фазы, а также вследствие неопределенности, обусловленной температурной неравновесностью ПС. Представляется перспективным использование бесконтактных способов измерения температур, в частности методов оптической пирометрии. Разработана методика спектрональной видеосъемки, позволяющая определить температурные поля в пространстве модельной камеры сгорания ПВРД, снабженной для визуализации плоским прозрачным элементом. Причем определение температуры проводится отдельно для твердой и газовой фаз в один тот же момент времени рабочего процесса за счет применения специальной оптической стереоприставки, удваивающей изображение и позволяющей каждое изображение регистрировать в двух различных длинах волн с помощью двух интерференционных светофильтров. Каждый из них предназначен для регистрации излучения к-фазы или газа (на длине волны излучения дублета натрия 589 нм). В качестве объекта исследования выбраны процессы воспламенения и горения аэрозвеси частиц алюминия АСД-1 в камере сгорания ПВРД. Приведены описание экспериментальной установки для спектрональной кино(видеосъемки) внутрикамерных рабочих процессов, схема и описание экспериментального участка с расположением оптической стереоприставки и видеокамеры, а также схемы построения изображений в системе зеркал. Представлены результаты и методика обработки кадров съемки рабочего процесса для двух различных режимов. Приведен анализ результатов обработки.

Ключевые слова: *прямоточный воздушно-реактивный двигатель, оптическая пирометрия, двухфазный поток, температурная неравновесность*

Введение. При разработке вновь создаваемых прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) часто возникает задача оптимизации конструкции камеры сгорания. Основным параметром, назначаемым как целевая функция, как правило, является качество рабочего процесса, определяемое полнотой сгорания горючего в воздушном потоке и характеризуемое, в частности, температурой продуктов сгорания и равномерностью смешения компонентов топлива [1, 2]. Оценить оба этих параметра можно при наличии информации о температуре в каждой точке объема камеры сгорания, что позволит определить геометрические и температурные параметры локальных зон повы-

шенных и пониженных температур, связанных с отклонением характеристик рабочего процесса от расчетных. При оценке качества рабочего процесса определяющей также является температурная неравновесность продуктов сгорания, характерная для высокотемпературных двухфазных потоков, например горящего в воздушном потоке порошкообразного алюминия. Таким образом, информация о температуре газовой и конденсированной фаз позволяет изучить структуру и рассчитать значения потерь вследствие наличия в потоке частиц к-фазы.

Измерение температуры продуктов сгорания твердого топлива контактными методами, например термопарами [3], вызывает затруднения, так как наличие конденсированной фазы вносит существенные искажения в их показания и приводит к эрозионному разрушению термопар. Кроме того, данный метод не позволяет выполнить измерения отдельно температур газовой и конденсированной фаз. Следовательно, необходимо применять бесконтактные методы измерения температуры, основанные, например, на регистрации излучения продуктов сгорания в видимом диапазоне длин волн. В связи с изложенным целью настоящей работы является разработка и практическая реализация метода спектральной кино(видеосъемки), позволяющей измерять температуру как газовой, так и конденсированной фаз продуктов сгорания.

Описание экспериментального участка. В качестве объекта исследования рассмотрим процесс горения порошкообразного алюминия в высокоскоростном воздушном потоке. Подробное описание экспериментальной установки и представленного на рис. 1 рабочего

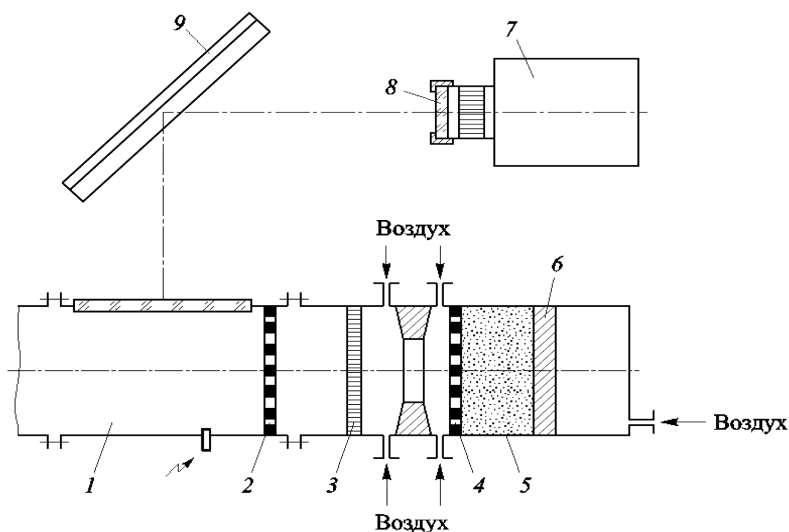


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — камера сгорания с прозрачным участком; 2 — перфорированная пластина-турбулизатор; 3 — выравнивающая пластина; 4 — перфорированная пластина; 5 — порошкообразный алюминий; 6 — поршень; 7 — видеокамера; 8 — двойной интерференционный светофильтр; 9 — система зеркал стереоприставки

участка приведено в работах [4, 5]. В рабочий участок, снабженный плоским прозрачным элементом из полиметилметакрилата, подают с заданными массовыми расходами порошкообразный алюминий АСД-1 и воздух. Процессы воспламенения, горения и стабилизации пламени на перфорированной пластине, задающей определенный уровень масштаба турбулентности потока, регистрируются через прозрачный участок камеры сгорания на кино-, видеокамеру. Далее по интенсивности почернения фотоэмульсии или по степени засветки ПЗС-матрицы в поле зрения объектива камеры с помощью метода оптической пирометрии [6] определяют температуру продуктов сгорания.

Спектрозональную съемку необходимо проводить одновременно в двух разных спектральных диапазонах, чтобы регистрация изображения прозрачного элемента конструкции осуществлялась одновременно на один и тот же чувствительный элемент-киноплёнку или ПЗС-матрицу. С этой целью для получения двух изображений разработана специальная оптическая стереоприставка, состоящая из двух наклоненных друг к другу плоских зеркал. Оптическая схема построения изображения с помощью стереоприставки приведена на рис. 2.

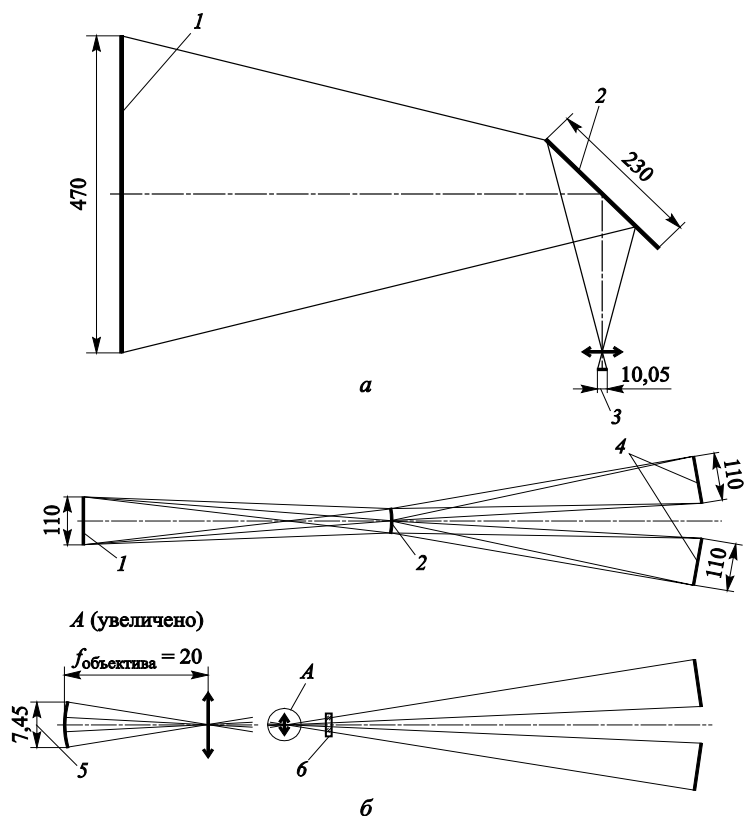


Рис. 2. Схема построения изображений в оптической стереоприставке: *а* — вид сверху; *б* — вид справа; 1 — объект съемки (прозрачный участок); 2 — система зеркал; 3 — ширина кадра; 4 — мнимые изображения прозрачного участка; 5 — высота кадра; 6 — два интерференционных светофильтра

Методика обработки результатов эксперимента. Более точное значение получается при определении яркостной температуры, которая регистрируется путем съемки в узком видимом спектральном диапазоне λ_{\max} , выделяемом используемым интерференционным светофильтром. Для получения значений яркостных температур и повышения информативности полутоновых черно-белых изображений проводят градуировку канала кино- или видеорегистрации и псевдоцветовое преобразование изображений по методикам [7], заключающимся в следующем. С помощью той же кино- (видео)камеры, при тех же настройках объектива и экспозиции проводят съемку эталонной светоизмерительной лампы СИ8-200 при прохождении через нее тока, определяющего яркостную температуру вольфрамового тела накала $T_{я.эф}$, и затем строят зависимость яркостной температуры (уровня серого) от силы тока.

По известным паспортным данным лампы в виде зависимости яркостной температуры лампы от силы тока можно определить яркостную температуру продуктов сгорания по формуле

$$T_{я} = \left[\frac{1}{T_{я.эф}} - \frac{\lambda_{\max} \ln \varepsilon_{\lambda_{\max}}^W - \lambda_{эф} \ln \varepsilon_{\lambda_{эф}}^W}{C_2} \right], \quad (1)$$

где $\varepsilon_{\lambda_{\max}}^W$ — коэффициент спектральной излучательной способности вольфрама W на максимуме длины волны пропускания интерференционного светофильтра; $\lambda_{эф}$ — длина волны, на которой проводилась калибровка яркостной температуры вольфрамового тела накала (650 нм); $\varepsilon_{\lambda_{эф}}^W$ — коэффициент спектральной излучательной способности вольфрама на длине волны пирометра, который использовался при калибровке светоизмерительной лампы; C_2 — постоянная излучения.

Истинную температуру продуктов сгорания можно рассчитать по формуле

$$T_f = \left[\frac{1}{T_{я}} + \frac{\lambda_{\max}}{C_2} \ln \varepsilon_{\lambda_{\max}} \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{\lambda_{\max}}$ — коэффициент спектральной излучательной способности конденсированных продуктов сгорания алюминия Al на максимуме длины волны пропускания интерференционного светофильтра.

Таким образом, в результате градуировки получается зависимость уровня серого изображения от истинной температуры продуктов сгорания. Далее по градациям серого создается шкала цветности

[8], где каждому цвету соответствует определенная степень серого, и по этому строгому соответствию исходное полутоновое изображение объекта преобразуется в псевдоцветовое.

Принципиальным моментом является выбор спектральных диапазонов, соответствующих максимумам пропускания интерференционных светофильтров. Известно, что при горении алюминия в воздухе в видимом спектральном диапазоне присутствуют колебательные полосы оксида алюминия AlO с передними кантами 465, 484, 508 и 533 нм (рис. 3) [9]. Следовательно, для спектрозональной съемки необходимо использовать интерференционный светофильтр, который будет пропускать излучение продуктов сгорания на длине волны, где отсутствует наложение сплошного спектра и молекулярных полос. В данной работе применяли интерференционный светофильтр с максимумом пропускания на длине волны 547 нм и по интенсивности излучения непрерывного спектра определяли яркостную температуру конденсированной фазы продуктов сгорания.

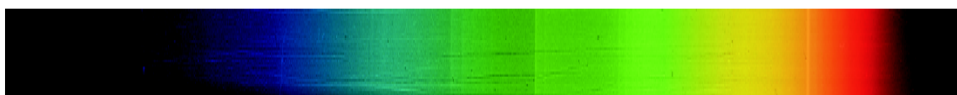


Рис. 3. Спектр излучения продуктов сгорания алюминия в воздухе

Температуру газовой фазы можно определить по интенсивности излучения дублета натрия Na , обусловленного изменением поступательной энергии атома, что в конечном счете характеризует температуру газового потока, в котором осуществляется его возбуждение. Поскольку насыщенный центр спектральной линии Na^D (589 нм) обладает излучательной способностью, $\epsilon_{Na^D} = 1$, то в результате измерения температуры на этой длине волны получают истинную температуру газовой фазы [10]. Характеристики интерференционных светофильтров показаны на рис. 4.

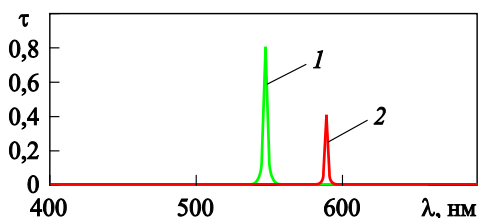


Рис. 4. Характеристики пропускания интерференционных светофильтров:
1 — $\lambda = 547$ нм; 2 — $\lambda = 589$ нм

Для повышения качества обработки и наглядности представления видеоизображений внутрикамерных процессов разработана методика и специальное программное обеспечение псевдоцветового преобразования полутонного черно-белого изображения методом переписывания значений интенсивностей сигналов по каналам RGB в каждом.

Программное обеспечение, включающее в себя вторичную обработку результатов, позволяет определять среднюю температуру по кадру, подсчитывать площади (в пикселях) изотемпературных зон, строить графики зависимости площадей изотемпературных зон и средней температуры по кадру от времени.

Анализ результатов спектрзональной съемки. С использованием разработанной методики спектрзональной съемки и оптико-электронного преобразования изображений получены следующие результаты. Проведен анализ кадров съемки рабочего процесса на следующих режимах: скорость воздуха $v_0 = 9,4$ м/с; давление ПС в камере сгорания 0,1 МПа. Исследования проводили для двух значений коэффициента избытка окислителя L : 0,22 и 0,255.

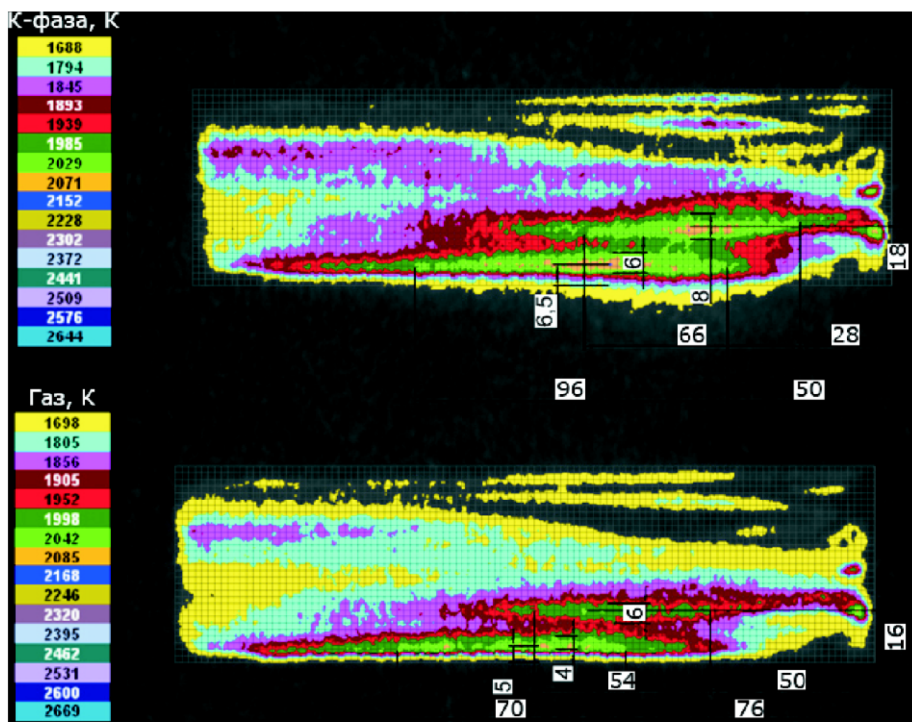
Результаты псевдоцветовой обработки кадров приведены на рис. 5. Видно, что алюминиево-воздушная смесь, поступающая справа, воспламеняется электроискровым разрядом (отключаемым после воспламенения) и стабилизируется на перфорированной пластине с коэффициентом живого сечения $f = 0,069$ за счет образования зон обратных токов, заполненных высокотемпературными продуктами сгорания (2071 К).

На рабочем режиме при $\alpha = 0,22$ (рис. 5, а) выявлены следующие особенности:

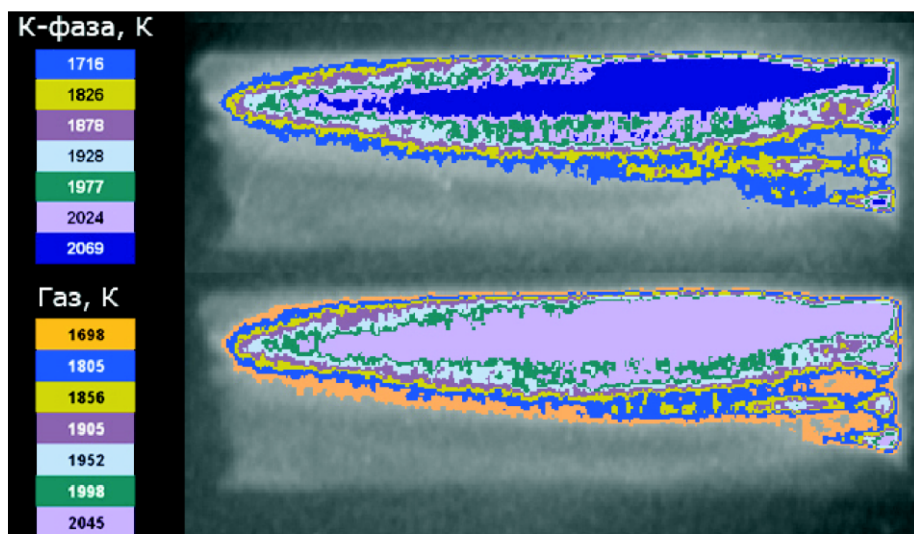
- максимальная температура к-фазы ~ 2070 К;
- максимальная температура газовой фазы ~ 2040 К;
- средняя температура по кадру к-фазы 1850 К;
- средняя температура по кадру газовой фазы 1810 К;
- средний характерный размер зон с максимальной температурой газовой фазы относительно зон с максимальной температурой к-фазы по высоте на 2 мм меньше и по длине на 15...20 мм короче;
- наблюдается смещение зон с максимальной температурой газовой фазы по вертикали минимум на 2 мм относительно ядер с максимальной температурой к-фазы, что может свидетельствовать о наличии вихрей с направлением движения в плоскости поперечного сечения камеры сгорания.

На рабочем режиме при коэффициенте избытка окислителя $\alpha = 0,256$ выявлены следующие особенности:

- максимальная температура к-фазы ~ 2069 К;
- максимальная температура газовой фазы ~ 2045 К;
- средняя температура по кадру к-фазы 1930 К;
- средняя температура по кадру газовой фазы 1930 К;



a



b

Рис. 5. Результаты спектрозональной съемки и оптико-электронной обработки изображения рабочего процесса при $v_0 = 9,4$ м/с и атмосферном давлении в рабочем участке:

a — $\alpha = 0,22$; b — $\alpha = 0,256$

• зона с максимальной температурой газовой фазы больше по объему и увеличена преимущественно в нижней части камеры сгорания, что, в свою очередь, может свидетельствовать о наличии вихрей в направлении движения потока в плоскости поперечного сечения камеры сгорания.

Заключение. Разработанная методика спектрально-аналитической видеосъемки позволяет определить температуру газовой и конденсированной фаз по всему пространству камеры сгорания и характерные размеры и расположения зон воспламенения и горения.

Из проведенного анализа двух рабочих режимов следует, что температура газовой фазы в обоих случаях меньше температуры конденсированной фазы в среднем на 30 градусов. Также в двух случаях наблюдается смещение зон очагов горения газовой фазы относительно конденсированной фазы, что может говорить о наличии поперечной составляющей вихрей потока.

Работа выполнена при поддержке Гранта Ведущей научной школы России, проект НШ-9774.2016.8.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Прохоров А.Н., Федотова К.В., Шаров М.С., Яновский Л.С. Методика экспериментальных исследований эффективности рабочего процесса в высокоскоростных ПВРД газогенераторной схемы на твердых топливах. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 2 (671), с. 65–75. DOI 10.18698/0536-1044-2016-2-65-75
- [2] Сорокин В.А., Яновский Л.С., Ягодников Д.А. [и др.]. *Проектирование и отработка ракетно-прямоточных двигателей на твердом топливе*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2016, 320 с.
- [3] Волков В.Т., Ягодников Д.А. *Исследование и стендовая отработка ракетных двигателей на твердом топливе*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 296 с.
- [4] Ягодников Д.А., Воронцов А.В. Влияние внешнего электрического поля на горение аэрозвеси частиц алюминия. *Физика горения и взрыва*, 1998, т. 34, № 6, с. 23–28.
- [5] Ягодников Д.А., Воронцов А.В., Сухов А.В. Исследование характеристик теплообмена при турбулентном горении аэродисперсных систем. *Теплообмен-ММФ-92. Теплообмен в химически реагирующих системах*, 1992, т. 3, с. 105–108.
- [6] Ягодников Д.А., Хомяков И.И., Бурков А.С., Артюхова О.А. Визуализация и анализ изображений процесса истечения продуктов сгорания пиротехнического состава из модельного газогенератора. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 3, с. 101–109.
- [7] Хомяков И.И., Бурков А.С., Бобров А.Н. Методика бесконтактной оптической и акустической диагностики и цифровой обработки результатов испытаний модельного газогенератора на твердом топливе. *Ракетно-космические двигатели и энергетические установки. Науч.-техн. сборник*. Москва, 2014, вып. 1 (158), с. 55–69.

- [8] Теплинский М.В., Ягодников Д.А. Цифровая обработка и анализ визуализации результатов огневых испытаний модельного ракетного двигателя на твердом топливе. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2005, № 3, с. 34–41.
- [9] Ягодников Д.А. *Воспламенение и горение порошкообразных металлов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 432 с.
- [10] Файзуллов Ф.С. Пирометрическое исследование состояния воздуха, азота и аргона за ударной волной. *Труды физического института АН СССР*, 1962, т. 18, с. 105–158.

Статья поступила в редакцию 18.08.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бурков А.С., Ягодников Д.А., Сухов А.В., Томак В.И. Спектральная диагностика процессов горения порошкообразного алюминия в воздушном потоке. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 10.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1686>

Бурков Андрей Сергеевич родился в 1986 г., окончил МАИ в 2010 г. Научный сотрудник отдела ЭМ1.4 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. Соавтор публикаций по экспериментальным исследованиям характеристик конструкционных материалов и бесконтактной диагностики высокотемпературных потоков. e-mail: mgtu-e14@mail.ru

Ягодников Дмитрий Алексеевич родился в 1961 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1984 г. Д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заведующий отделением ЭМ1 НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 230 научных работ в области экспериментально-теоретических исследований рабочих процессов и разработки бесконтактных методов диагностики ракетных и реактивных двигателей. e-mail: daj@bmstu.ru

Сухов Алексей Васильевич родился в 1937 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области горения металлосодержащих энергетических конденсированных систем и методологии диагностики рабочих процессов в ракетных и реактивных двигателях.

Томак Виктор Иванович родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Канд. техн. наук, заведующий отделом ЭМ1.4 НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 изобретений и более 20 научных работ в области экспериментальной отработки ракетных и реактивных двигателей и конструкционных материалов ракетно-космической техники. e-mail: mgtu-14@mail.ru

Spectrozoal diagnostics of powdered aluminum combustion processes in the air stream

© A.S. Burkov, D.A. Yagodnikov, A.V. Sukhov, V.I. Tomak

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

When designing ramjet engines, the problem of optimizing the model engine design often arises. Optimization is improving the quality of the working process of fuel combustion in the combustion chamber. The criterion for its estimation can be the temperature of the combustion products (CP): its value and the distribution in the chamber volume. Measurement of the CP two-phase flow temperature is associated with certain difficulties, since using contact methods does not provide reliable information about temperature due to the effect of the condensed phase on the sensitive element, and also due to the uncertainty caused by the CP temperature non-equilibrium. It seems promising to use contactless methods for measuring temperatures, in particular optical pyrometry methods. The technique of spectrozoal video shooting is developed. It allows determining the temperature fields in the space of a model ramjet combustion chamber equipped with a flat transparent element for visualization. What is more, the determination of the temperature is carried out simultaneously separately for the solid and gas phases due to using a special optical stereo attachment doubling the image and allowing each image to be recorded at two different wavelengths using two interference filters. Each of them is designed to record the radiation of the k-phase or gas (at the radiation wavelength of the sodium doublet of 589 nm). The processes of ignition and combustion of the air suspension of aluminum particles ASD-1 in the ramjet combustion chamber were chosen as the object of investigation. The description of the experimental setup for spectrozoal filming (video shooting) intra-chamber work processes is given, the layout and description of the experimental section with the location of the optical stereo attachment and the video camera, as well as imaging scheme in the mirror system are described. The techniques and results of processing the workflow shots for two different modes are presented. The analysis of processing results is given.

Keywords: ram jet, optical pyrometry, two-phase flow, temperature nonequilibrium

REFERENCES

- [1] Aleksandrov V.Yu., Arefyev K.Yu., Prokhorov A.N., Fedotova K.V., Sharov M.S., Yanovsky L.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 2 (671), pp. 65–75. DOI 10.18698/0536-1044-2016-2-65-75
- [2] Sorokin V.A., Yanovsky L.S., Yagodnikov D.A. et al. *Proektirovanie i otrabotka raketno-pryamotoknykh dvigateley na tverdom toplive* [Designing and developing of solid propellant rocket-ramjet engines]. Moscow, BMSTU Publ., 2016, 320 p.
- [3] Volkov V.T., Yagodnikov D.A. *Issledovanie i stendovaya otrabotka raketnykh dvigateley na tverdom toplive* [Research and bench testing solid propellant rocket engines]. Moscow, BMSTU Publ., 2007, 296 p.
- [4] Yagodnikov D.A., Voronetsky A.V. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1998, vol. 34, no. 6, pp. 23–28.
- [5] Yagodnikov D.A., Voronetsky A.V., Sukhov A.V. *Issledovanie kharakteristik teplomassoobmena pri turbulentnom gorenii aerodispersnykh system* [Research

- of the characteristics of heat and mass transfer in the turbulent combustion of aerodisperse systems]. *Trudy II Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplo- i massoobmenu "Teplomassoobmen-MMF-92". Tom 3. Teplomassoobmen v khimicheski reagiruyushchikh sistemakh* [Proceedings of the II Minsk International Forum on Heat and mass transfer "Heat-and-mass-transfer -MMF-92". Vol. 3. Heat and mass transfer in chemically reacting systems]. 1992, pp. 105–108.
- [6] Yagodnikov D.A., Khomyakov I.I., Burkov A.S., Artukhova O.A. *Vestnic MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2014, no. 3, pp. 101–109.
- [7] Khomyakov I.I., Burkov A.S., Bobrov A.N. Metodika beskontaktnoy opticheskoy i akusticheskoy diagnostic i tsifrovoy obrabotki rezultatov ispytaniy modelnogo gasogeneratora na tverdom toplive [Techniques of contactless optical and acoustic diagnostics and digital processing of test results of model gas generator on solid fuel]. *Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik "Raketno-kosmicheskie dvigateli i energeticheskie ustanovki* [Collection of scientific and technical papers "Rocket-space engines and power plants"]. Gubertov A.M., ed. Moscow, Federal Space Agency Publ., 2014, no. 1 (158), pp. 55–69.
- [8] Teplinsky M.V., Yagodnikov D.A. *Vestnic MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroyeniye — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2005, no. 3, pp. 34–41.
- [9] Yagodnikov D.A. *Vosplamnenie i gorenje poroshkoobraznykh metallov* [Ignition and combustion of powdered metals]. Moscow, BMSTU Publ., 2009, 432 p.
- [10] Fayzullov F.S. *Trudy fizicheskogo instituta AN SSSR — Proceedings of Lebedev Physical Institute*, 1962, vol. 18, pp. 105–158.

Burkov A.S. (b. 1986) graduated from Moscow Aviation Institute in 2010. Researcher, Department EM1.4, Research Institute EM, graduate student (Ph. D.), Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: bench testing rocket and jet engines. Co-author of publications on experimental studies of the structural material characteristics and non-contact diagnostics of high-temperature flows. e-mail: mgtu-e14@mail.ru

Yagodnikov D.A. (b. 1961) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1984. Dr. Sc. (Eng.), head of the Department of Rocket Engines, head of the Division EM1, Research Institute EM, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 230 research publications in the field of experimental and theoretical research of working processes and the development of contactless methods for the diagnosis of rocket and jet engines. e-mail: daj@bmstu.ru

Sukhov A.V. (b. 1937) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Author of over 100 research publications in the field of combustion of metal-containing energy condensed systems and the methodology for diagnosing work processes in rocket and jet engines.

Tomak V.I. (b.1946) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Cand. Sc. (Eng.), head of the Department EM1.4, Research Institute EM, Bauman Moscow State Technical University. Author of 10 inventions and over 20 research publications in the field of experimental development of rocket and jet engines and structural materials of rocket and space technology. e-mail: mgtu-14@mail.ru