

Registration of the Brightness Temperature Field of a Jet of a Rocket Engine

S.I. Gerasimov^{1,2}, A.A. Glukhov², V.I. Erofeev¹, N.A. Trepalov²

¹Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences –
Branch of Federal Research Center “Institute of Applied Physics of the RAS”,
Nizhny Novgorod, 603024, Russia

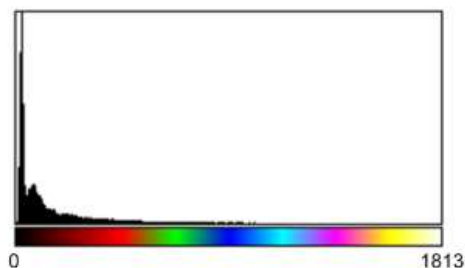
²Sarov Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University MEPhI,
Sarov, Nizhny Novgorod Region, 607186, Russia

erof.vi@yandex.ru

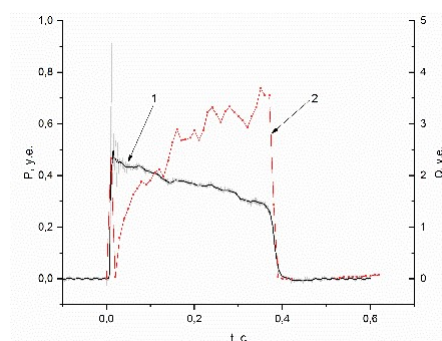
Abstract

To accelerate rocket trains to speeds of up to two kilometers per second, solid propellant rocket engines are used. The development of the traction characteristics of such engines is carried out at the fire test stand. In the published work, a non-contact method for measuring temperature during engine testing on a test bench is proposed, based on the use of high-speed video recording of the combustion products outflow process to determine the brightness temperature of a rocket engine jet during fire bench tests. A monochrome high-speed video camera was used in the experiment. Video recording was carried out in natural light conditions in a narrow spectral range. Limitation of the spectral sensitivity of the receiving matrix of the video camera was carried out using a light filter mounted on the lens of the video camera. To use a high-speed video camera as a pyrometer, it was pre-calibrated with video recording parameters similar to the experiment. The brightness of the image of the temperature lamp was recorded at various values of the temperature of the tungsten filament of the lamp. The analysis of the registered images was carried out in the ImageJ software package. It is shown that the registered calibration dependence is non-linear. An analytical relation is proposed that satisfactorily approximates this dependence. It has been demonstrated that the use of high-speed video recording in the video pyrometry mode makes it possible to increase the information content of tests. The results of video recording make it possible to determine the characteristic times of engine operation and to determine the field of brightness temperature of the outflowing combustion products.

Keywords: video recording, combustion products, brightness temperature, rocket engine.



Histogram of brightness temperature distribution



Change in thrust P (1) solid propellant rocket motor and parameter Q (2) over time

УДК533.6

Регистрация поля яркостной температуры струи ракетного двигателя

С.И. Герасимов^{1,2}, А.А. Глухов², В.И. Ерофеев¹, Н.А. Трепалов²

¹Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального исследовательского центра Института прикладной физики Российской академии наук, Россия, Нижний Новгород, 603024, ул. Белинского, д.85

²Саровский физико-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Россия, Нижегородская область, г. Саров, 607186, ул. Духова, д. 6

erof.vi@yandex.ru

Аннотация

Для разгона ракетных поездов до скоростей, достигающих двух километров в секунду, применяются ракетные двигатели твердого топлива. Обработка тяговой характеристики таких двигателей осуществляется на стенде огневых испытаний. В публикуемой работе предложен бесконтактный метод измерения температуры при отработке двигателей на испытательном стенде, основанный на применении высокоскоростной видеорегистрации процесса истечения продуктов сгорания для определения яркостной температуры струи ракетного двигателя при проведении огневых стендовых испытаний. В эксперименте использовалась монохромная высокоскоростная видеокамера. Видеорегистрация осуществлялась в условиях естественного освещения в узком спектральном диапазоне. Ограничение спектральной чувствительности приемной матрицы видеокамеры осуществлялось с помощью светофильтра, установленного на объектив видеокамеры. Для применения высокоскоростной видеокамеры в качестве пирометра, произведена ее предварительная калибровка при параметрах видеорегистрации, аналогичных эксперименту. Регистрировалась яркость изображения температурной лампы при различных значениях температуры вольфрамового тела накала лампы. Анализ зарегистрированных изображений осуществлялся в программном комплексе ImageJ. Показано, что зарегистрированная калибровочная зависимость имеет нелинейный характер. Предложено аналитическое соотношение, удовлетворительно аппроксимирующее эту зависимость. Продемонстрировано, что применение высокоскоростной видеорегистрации в режиме видеопирометрии позволяет повысить информативность испытаний. Результаты видео регистрации позволяют определить характерные времена работы двигателя и определить поле яркостной температуры истекающих продуктов сгорания.

Ключевые слова: видеорегистрация, продукты сгорания, яркостная температура, ракетный двигатель.

1. Введение

При создании и отработке перспективных ракетных и реактивных двигательных установок в изделиях ракетно-космической техники важным этапом является проведение огневых стендовых испытаний (ОСИ). Основная задача этого этапа заключается в проверке работоспособности систем и агрегатов двигателя, подтверждении внутрибаллистических, энергетических и эксплуатационных характеристик. Учитывая высокие значения стоимости и трудоемкости проведения ОСИ, актуальной является задача разработки новых экспериментальных методов и средств испытаний, основанных на современных информационных тех-

нологиях и обеспечивающих увеличение объема, точности и достоверности экспериментальной информации.

В ходе проведения ОСИ ракетных двигателей на твердом топливе (РДТТ), кроме регистрации экспериментальной информации, необходимой для определения внутрибаллистических и тяговых характеристик двигателя, существует потребность в температурных измерениях [1]. Результаты данных измерений позволяют судить о работоспособности двигательной установки и ее агрегатов, о процессах, протекающих при работе РДТТ. Большое значение имеют экспериментальные данные о температуре наружных поверхностей двигателя и его узлов. Результаты этих измерений служат для подтверждения условий нормального функционирования узлов и элементов конструкции, эффективности принятых мер по их защите от нагрева. Измеренные значения температур газовых потоков уточняют сведения о теплообменных процессах, протекающих при работе двигателя, позволяют подтвердить правильность предположений и основных положений, заложенных в расчетные зависимости.

Наиболее распространенным методом измерения температуры является контактный метод, основанный на применении температурных датчиков (термопар). Данный метод, в особенности в условиях двухфазного потока, формируемого при работе РДТТ, имеет целый ряд недостатков. Метод является контактным, и следствием его применения является внесение нежелательных возмущений в исследуемую область. Регистрация температуры осуществляется в локальной области, а для получения поля температуры требуется установка большого количества датчиков, что ведет к усложнению схемы регистрации. Кроме того, наличие конденсированной фазы в продуктах сгорания приводит к разрушению датчика и возникновению дополнительных погрешностей из-за оседания конденсированных частиц на термопаре и возникновении паразитных термо-ЭДС в местах контакта частиц и спая. С целью устранения указанных недостатков в последнее время разрабатываются нетрадиционные методы диагностики двигательных установок, основанные, например, на регистрации электрофизических и электромагнитных характеристик рабочего процесса [2 – 4]. Для дистанционной диагностики температуры используются методы оптической пирометрии, среди которых большое распространение получили методы яркостной и цветовой пирометрии [5]. Реализация метода яркостной пирометрии на базе цифровой видеокамеры применяется в различных областях науки и техники для определения температурных полей [6–9].

В данной работе продемонстрировано применение высокоскоростной видеорегистрации для определения яркостной температуры струи РДТТ при проведении ОСИ.

2. Схема регистрации

При проведении ОСИ РДТТ осуществлялась высокоскоростная видеорегистрация процесса истечения продуктов сгорания. Схема регистрации приведена на рис. 1. Использовалась монохромная высокоскоростная видеокамера с динамическим диапазоном сенсора 12 бит. Видеорегистрация осуществлялась в условиях естественного освещения в узком спектральном диапазоне (900 ÷ 1100 нм) с частотой съемки 1 кГц, временем экспонирования кадра 10 мкс, при разрешении кадра 1280 × 800 пикс. Ограничение спектральной чувствительности приемной матрицы видеокамеры осуществлялось с помощью светофильтра ИКС-3 (3 мм) [10, 11], установленного на объектив видеокамеры.

Для применения высокоскоростной видеокамеры в качестве пирометра, необходима ее предварительная калибровка при параметрах видеорегистрации аналогичных эксперименту. Данная процедура была проведена по методике, описанной в [7]. Регистрировалась яркость изображения температурной лампы при различных значениях температуры вольфрамового тела накала лампы. Анализ зарегистрированных изображений осуществлялся в программном комплексе ImageJ [12]. Полученная калибровочная зависимость приведена на рис. 2.

Зарегистрированная зависимость имеет нелинейный характер и удовлетворительно аппроксимируется зависимостью

$$I(T) = \frac{A}{1 + B \exp(-CT)}, \quad (1)$$

где I – яркость пикселя изображения в градациях серого ($0 \div 4095$); T – температура вольфрамового тела накала лампы, К; $A = 4238.1781$, $B = 4.1059 \times 10^6$, $C = 0.0103$ – коэффициенты аппроксимации.

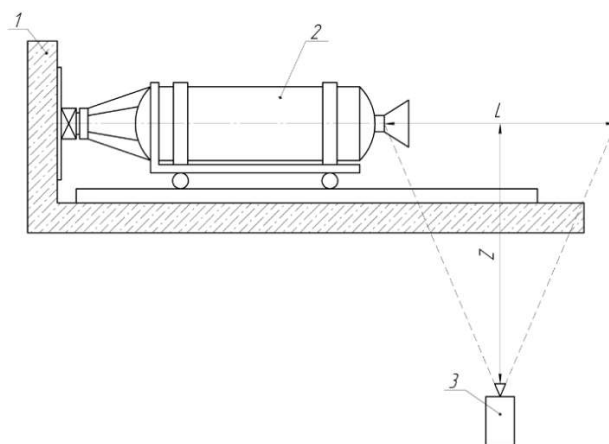


Рис. 1. Схема регистрации: 1 – стенд огневых испытаний, 2 – РДТТ, 3 – высокоскоростная видеокамера, $Z = 17$ м, $L = 2$ м

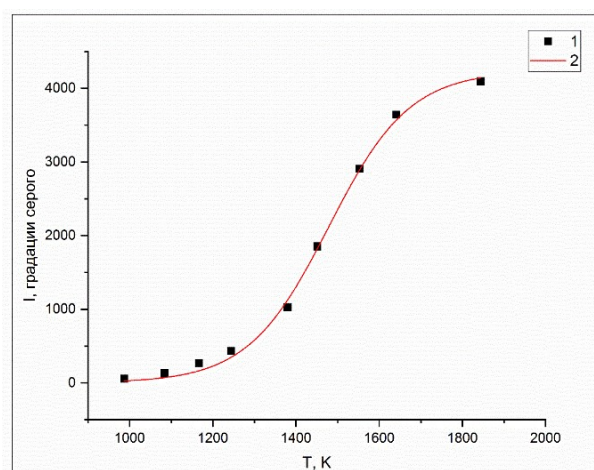


Рис. 2. Экспериментальные значения яркости пикселей изображения вольфрамового тела накала лампы при его различной температуре (1) и аппроксимирующая зависимость (2)

Оптимальным температурным участком для регистрации является диапазон от 1400 до 1600 К, что соответствует линейному участку зарегистрированной калибровочной зависимости. Изменение этого диапазона возможно за счет корректировки параметров схемы видеорегистрации отвечающих за яркость результирующего изображения (применение нейтральных светофильтров, изменения времени экспонирования кадра и значения диафрагмы).

3. Анализ полученных результатов

Зарегистрированная в эксперименте видеoinформация была сохранена в виде последовательности графических файлов в формате *.tiff. Дальнейшая обработка графических файлов осуществлялась в программном комплексе ImageJ [12]. В соответствии с калибровочной

кривой (1) значению яркости определенного пикселя изображения соответствует определенное значение яркостной температуры. Для наилучшего восприятия осуществлялось псевдоцветовое преобразование полутоновых черно-белых изображений в соответствии с таблицей преобразования «6 shades», графическое отображение которой представлено на рис. 3. Таким образом, каждому цвету на результирующем изображении соответствует определенное значение яркостной температуры. Фрагменты результатов обработки изображений представлены на рис. 4. На начальной стадии работы двигателя яркостная температура истекающих продуктов сгорания не превышает 1300 К, в дальнейшем наблюдается локальное увеличение яркостной температуры ядра каждой струи. Максимальное значение яркостной температуры струи зарегистрировано на 370 мс работы двигателя и составило 1800 К.

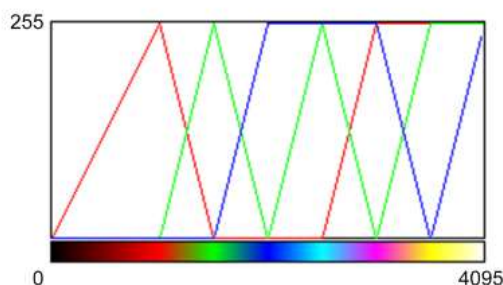


Рис. 3. Алгоритм используемого псевдоцветового преобразования

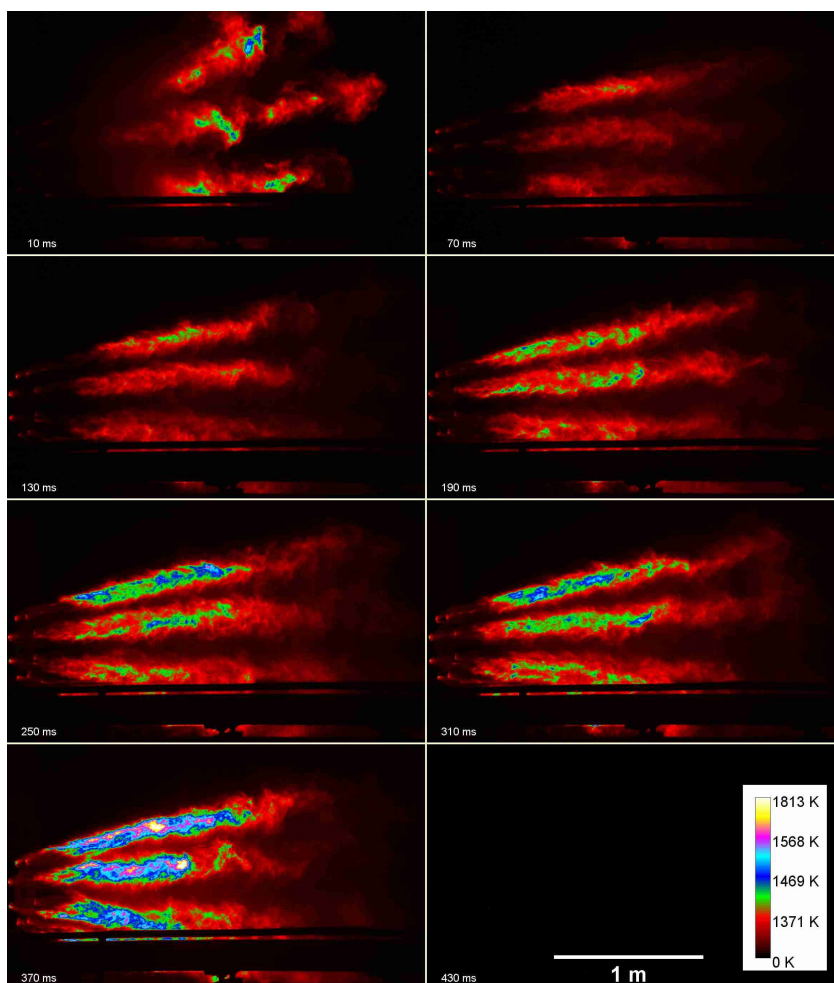


Рис. 4. Поле яркостной температуры струи РДТТ

Анализ гистограммы распределения яркостной температуры позволяет получить количественную информацию о динамике изменения размера излучающей области с определенной температурой. В качестве примера на рис. 5 приведена гистограмма распределения яркостной температуры в пределах области регистрации видеокамеры в менте времени 370 мс относительно начала работы двигателя. Для интегральной оценки излучающей области использовалось безразмерное выражение

$$Q = 10^{-5} \sigma \int_0^{T_{я \max}} T_{я}^4 S(T_{я}) dT_{я}, \quad (2)$$

где $T_{я}$ – яркостная температура излучающей области, К; S – суммарная площадь излучающей области с температурой $T_{я}$, м²; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ Вт·м²·К⁻⁴ – постоянная Стефана – Больцмана.

Изменение данного параметра Q с течением времени представлено на рис. 6.

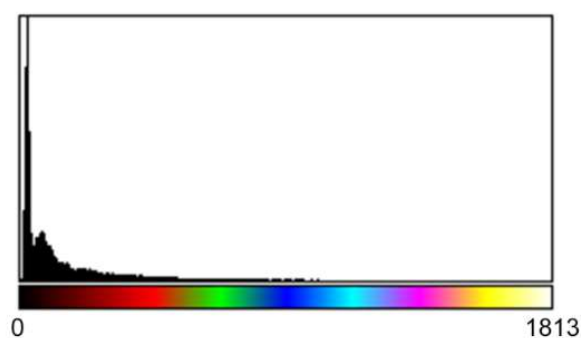


Рис. 5. Гистограмма распределение яркостной температуры

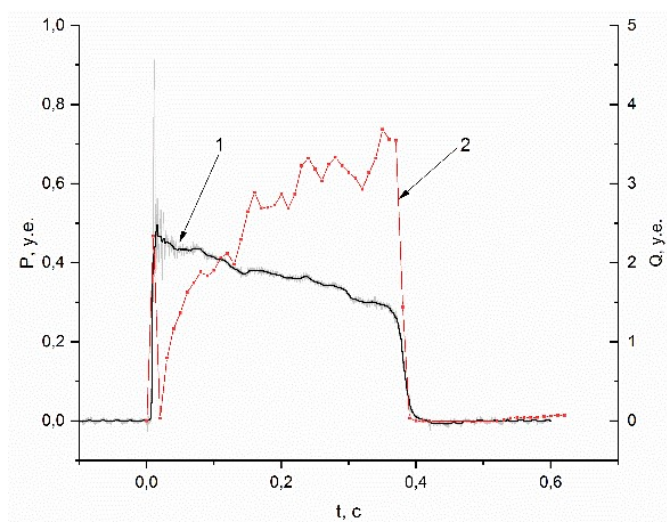


Рис. 6. Изменение тяги P (1) РДТТ и параметра Q (2) во времени

При выходе РДТТ на расчетный режим, как правило, в камере сгорания возникает интенсивный ударно-волновой процесс [13, 14]. Он характеризуется высокой амплитудой колебаний давления и других газодинамических параметров. На представленных результатах регистрации, при формировании истекающих струй продуктов сгорания наблюдается импульсное увеличение Q , связанное с наличием высокотемпературных областей. Данные области существуют относительно короткое время, на 70 мс наблюдается сформированное струйное течение продуктов сгорания, яркостная температура ядра которых с течением времени нарастает.

Для определения истинной температуры струи РДТТ на основе результатов регистрации яркостной температуры необходимо знать монохроматический коэффициент излучательной способности конденсированных продуктов сгорания твердого ракетного топлива. Следует заметить, 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 коэффициента излучательной способности в видимом диапазоне спектра практически не отличается от единицы [15, 16]. В связи с этим, данные, получаемые в эксперименте с помощью описанного подхода, пригодны для оценки истинной температуры струи РДТТ.

4. Заключение

Применение высокоскоростной видеорегистрации в режиме видеопирометрии при проведении ОСИ РДТТ позволяет повысить информативность испытаний. Результаты видеорегистрации позволяют определить характерные времена работы РДТТ и определить поле яркостной температуры истекающих продуктов сгорания.

Благодарности и ссылки на гранты

Работа выполнялась при поддержке Российского научного фонда (Грант № 20-19-00613).

Литература

1. Волков В.Т., Ягодников Д.А. Исследование и стендовая отработка ракетных двигателей на твердом топливе. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 296 с.
2. Гафуров Р.А., Соловьев В.В. Диагностика внутрикамерных процессов в энергетических установках. М.: Машиностроение, 1991. 272 с.
3. Головин Ю. М. Перспективы развития систем диагностики и аварийной защиты ЖРД // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики. 2002. № 9. С. 34–38.
4. Ягодников Д.А., Рудинский А.В. Диагностика ракетных и реактивных двигателей по характеристикам собственного электромагнитного поля продуктов сгорания // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. № 5. С. 828–845.
5. Свет Д.Я. Оптические методы измерения истинных температур. М.: Наука, 1982. 296 с.
6. Мошаров В.Е., Радченко В.Н., Сенюев И.В. Пирометрия с использованием п.з.с.–камер // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 4. С.132–137.
7. Ягодников Д.А., Хомяков И.И., Бурков А.С., Самородов А.В., Артюхова О.А., Яновский Л.С., Суриков Е.В. Скоростная видеосъемка и цифровая обработка изображений выхлопной струи модельного газогенератора на твердом топливе // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 4(16). С. 43–55.
8. Бороненко, М.П., Гуляев П.Ю. Телевизионная измерительная система наносекундного разрешения // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. № 1(31). С.60–64.
9. Inman J.A., Danehy P.M., Jones S.B., Lee J.W. High-speed imaging optical pyrometry for study of boron nitride nanotube generation //30th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. AIAA Paper 2014-2526, 2014. 13 p. Corpus ID: 137566910.
10. ГОСТ 9411-91 Стекло оптическое цветное. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1992. 48 с.
11. Каталог цветного стекла. М.: Машиностроение, 1967. 63 с.

12. Schneider C.A., Rasband W.S., Eliceiri K.W. NIHImage to ImageJ: 25 years of image analysis // *Nature Methods*. 2012. Vol. 9. No. 7. Pp. 671–675.
13. Ерохин Б.Т., Липанов А.М. Нестационарные и квазистационарные режимы работы РДТТ. М.: Машиностроение, 1977. 200 с.
14. Внутренняя баллистика РДТТ: Справочная библиотека разработчика-исследователя / Под ред. А. М. Липанова, Ю. М. Милёхина. М.: Машиностроение, 2007. 504 с.
15. Мальцев В.М., Мальцев М.И., Кашпоров Л.Я. Основные характеристики горения. М.: Химия, 1977. 320 с.
16. Ягодников Д.А., Воронецкий А.В., Лапицкий В.И. Распространение пламени по аэровзвеси алюминия при пониженных давлениях // *Физика горения и взрыва*. 1995. Т. 31. № 5. С. 23–31.

References

1. Volkov, V. T., Yagodnikov, D. A., *Issledovanie i stendovaja otrabotka raketnyh dvigatelej na tverdom toplive* (Research and Bench Testing of Solid Propellant Rocket Engines), Moscow, Publishing House of the Bauman MSTU, 2008, 296 p.
2. Gafurov, R. A., Soloviev, V. V., *Diagnostika vnutrikamernyh processov v jenergeticheskikh ustanovkah* (Diagnosis of Intra-Chamber Processes in Power Plants), Moscow, Mashinostroenie, 1991, 272 p.
3. Golovin, Yu. M., “Perspektivy razvitiya sistem diagnostiki i avarijnoj zashhity ZhRD,” *Fundamental'nye i prikladnye problemy kosmonavtiki*, 2002, No. 9, pp. 34–38.
4. Yagodnikov, D. A., Rudinskii, A. V., “Diagnostics of rocket and jet engines through characteristics of the intrinsic electromagnetic field of combustion products”, *High Temperature*, Vol. 55, No. 5, 2017, pp. 808–824.
5. Svet, D. Ya., *Opticheskie metody izmerenija istinnyh temperatur* (Optical Methods for Measuring True Temperatures), Moscow, Nauka, 1982, 296 p.
6. Mosharov, V. E., Radchenko, V. N., Senyuev, I. V., “Pirometrija s ispol'zovaniem p.z.s.–kamer,” *Pribory i tehnika jeksperimenta*, Vol. 56, No. 4, 2013, pp.491–496.
7. Yagodnikov, D. A., Khomyakov, I. I., Burkov, A. S., Samorodov, A. V., Artyukhova, O. A., Yanovsky, L. S., Surikov, Ye. V., “Skorostnaja videos'emka i cifrovaja obrabotka izobrazhenij vyhlopnoj strui model'nogo gazogeneratora na tverdom toplive,” *Inzhenernyj zhurnal: Nauka i Innovacii*, No. 4(16), 2013, pp. 43–55.
8. Boronenko, M. P., Gulyaev, P. Yu., “Televizionnaja izmeritel'naja sistema nanosekundnogo razresheniya,” *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravlenija i radioelektroniki*, No. 1(31), 2014, pp. 60–64.
9. Inman, J. A., Danehy, P. M., Jones, S.B., Lee, J.W. “High-speed imaging optical pyrometry for study of boron nitride nanotube generation,” *30th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference*, AIAA Paper 2014-2526, June 2014. <https://doi.org/10.2514/6.2014-2526>
10. GOST 9411-91 *Steklo opticheskoe cvetnoe. Tehnicheskie uslovija* (Colored Optical Glass. Specifications), Moscow, Izd-vo standartov, 1992, 48 p.
11. *Katalog cvetnogo stekla* (Catalog of Colored Glass), Moscow, Mashinostroenie, 1967, 63 p.
12. Schneider, C. A., Rasband, W. S., Eliceiri, K. W., “NIHImage to ImageJ: 25 years of image analysis,” *Nature Methods*, Vol. 9, No. 7, 2012, pp. 671–675.
13. Erokhin, B. T., Lipanov, A. M., *Nestacionarnye i kvazistacionarnye rezhimy raboty RDTT* (Non-Stationary and Quasi-Stationary Modes of Operation of Solid Propellant Rocket Engines), Moscow, Mashinostroenie, 1977, 200 p.
14. *Vnutrennjaja ballistika RDTT: Spravochnaja biblioteka razrabotchika-issledovatelja* (Internal Ballistics of Solid Propellant Rocket Engines: Reference Library of the Developer-Researcher), Eds. A. M. Lipanov, Yu. M. Milekhin. Moscow, Mashinostoenie, 2007, 504 p.

15. Maltsev, V. M., Maltsev, M. I., Kashporov, L. Ya., *The Main Characteristics of Combustion*, Moscow, Chemistry, 1977, 320 p.
16. Yagodnikov, D. A., Voronetsky, A. V., Lapitsky, V. I., “Flame propagation through an aluminum aerosuspension at reduced pressure”, *Combustion, Explosion and Shock Waves*, Vol. 31, No. 5, 1995, pp. 23–31.

Статья поступила в редакцию 9 сентября 2022 г.