

М. В. Теплинский, Д. А. Ягодников

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОГНЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ МОДЕЛЬНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ТВЕРДОМ ТОПЛИВЕ

Рассмотрены методики оптико-электронной обработки видеозображений внутрикамерных процессов ракетного двигателя на твердом топливе на основе цифровых технологий и приведены результаты экспериментальных исследований, подтверждающие возможность использования предлагаемых методов при огневых испытаниях ракетных двигателей на твердом топливе.

Одно из направлений создания перспективных двигательных установок на твердом топливе (РДТТ) и жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) для средств выведения ракетно-космической техники связано с разработкой надежных и высокоэффективных методов и средств диагностики, необходимых для реализации наилучших технических характеристик РДТТ и ЖРД при наименьших экономических затратах. Традиционные методы исследования характеристик рабочего процесса в камерах сгорания (КС) не всегда эффективны, особенно в случае необходимости диагностики физико-химических процессов в объеме КС, и практически не пригодны для создания системы управления, мгновенно реагирующей на аналогичные изменения рабочего процесса. В целях устранения указанных недостатков в последнее время разрабатываются нетрадиционные методы диагностики, основанные, например, на визуализации характеристик рабочего процесса.

Основные методы визуализации рабочего процесса в ракетных двигателях. Оптимизация параметров рабочего процесса в ракетных двигателях возможна только на основе изучения закономерностей всех стадий внутрикамерных процессов. Это требует использования специальных методов диагностики, имеющих высокую информативность и позволяющих регистрировать достаточно большое количество параметров. При измерении температуры системы, где протекают интенсивные химические реакции, используют два принципиально различных метода [1, 2]: зондовую и радиационную пирометрию. В условиях однофазных и двухфазных потоков термодиагностика имеет целый ряд недостатков. Прежде всего зонд воздействует на исследуемую систему, так как зондирование — это контактный метод определения температуры. Возмущения, обусловленные термопарой, обычно бывают аэродинамического, термического и химического

характера. Влияние термопары можно снизить, уменьшая размер спая. Но одновременно с этим снижается термостойкость зонда в высокотемпературных потоках и уменьшается область, которую зондирует термопара. 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, что ведет к усложнению системы измерения и увеличению погрешности метода. Кроме того, при исследовании двухфазного потока выявлено, что на термопару оседают конденсированные частицы продуктов сгорания, вызывая дополнительные погрешности измерений, связанные с возникновением “паразитных” термо-ЭДС в местах контакта частиц κ -фазы и спая.

Эти соображения предопределили интенсивную разработку методов оптической пирометрии, для регистрации электромагнитного излучения продуктов сгорания в видимой, ультрафиолетовой, и инфракрасной областях спектра. С помощью радиационных методов топливной смеси измеряют температуру объекта, находящегося в поле регистрации измерительной системы, поэтому обычно получают значения температур, осредненные по сечению пламени. Основные преимущества этих методов заключаются в следующем.

1. Оптические методы не вносят возмущений в изучаемый объект и не вызывают изменений его физико-химических свойств.

2. Позволяют одновременно исследовать весь объем, в котором протекают процессы горения или излучения отдельных компонентов рабочего тела.

3. Эти методы можно применять для диагностики нестационарных, быстропротекающих процессов, поскольку они не имеют инерционности.

4. Существует принципиальная возможность определения химического состава продуктов сгорания при помощи, например, спектрального анализа, либо лазерных методов диагностики.

Другим достаточно эффективным оптическим методом является визуализация исследуемых процессов при помощи скоростной микро-, макросъемки и фотографирования. Микросъемка применяется обычно для исследования горения одиночных частиц металлов. При этом разработаны методики, позволяющие регистрировать треки горящих частиц и неподвижные частицы в окислительной среде различного химического состава. В обоих случаях рабочий участок снабжен специальными окнами, являющимися в некоторых установках конструктивными элементами. При регистрации процессов горения на кино- и фотопленку измеряемыми параметрами служат временные характеристики: время задержки воспламенения, время горения и др. Кроме того, можно

также измерять температуру горящих частиц по интенсивности почернения трека на кинокадре или видеоизображении. Возможность одновременного определения временных и температурных характеристик обусловлена тем, что изображение излучающего объекта несет большой объем информации, а регистрация последней на фотоматериал позволяет сохранить ее в полном объеме.

Одна из серьезных трудностей, связанных с применением оптических методов диагностики внутрикамерных процессов, заключается в выборе конструкционного материала прозрачного элемента установки и организации надежного охлаждения, поскольку температура в ядре исследуемого потока может достигать 3000...4000 К. В зависимости от условий проведения эксперимента эта задача решается по-разному. В большинстве случаев в качестве конструкционного материала применяется кварцевое стекло. При исследовании рабочего процесса в КС ЖРД [3] отмечается малая информативность испытаний с данным материалом, поскольку высаждение κ -фазы (частиц сажи) на внутренних стенках кварцевой трубы практически полностью лишало ее оптических свойств, а в отдельных экспериментах стекло разрушалось, не выдерживая давления в КС.

Обработка киноизображений в целях получения количественной информации, проводимая традиционными методами, связана с большими затратами времени. Поэтому ведут разработку методик оптико-электронной обработки оптической информации [4], заключающихся в преобразовании видеосигнала в кодовый эквивалент. Наличие в измерительной цепи аналого-цифровых сигналов облегчает их ввод в ЭВМ [4], а с использованием волоконной оптики [5] появляется дополнительная возможность обработки информации в процессе выполнения эксперимента без использования промежуточного носителя. 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, цифровая видеотехника, высокопроизводительные компьютеры дают возможность реализовать в наибольшей степени преимущества оптических методов диагностики.

В связи с изложенным цель настоящей работы — разработка методики видеосъемки и цифровой обработки изображений на ПЭВМ в целях исследования характеристик рабочего процесса в ракетных двигателях, определяющих полноту сгорания топлива и газодинамическую картину течения.

Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента. Экспериментальные исследования проведены на модельной

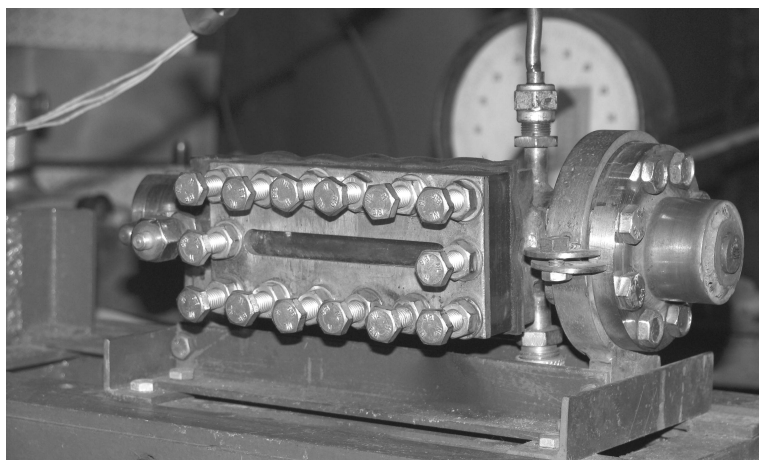


Рис. 1. Общий вид модельной камеры сгорания

ракетной двигательной установке, состоящей из камеры (объект испытания), систем электровоспламенения образца топлива, подачи и контроля расхода воздуха, регистрации давления и температуры в камере (система измерения), утилизации продуктов сгорания и системы визуализации рабочего процесса.

Внешний вид модельной камеры показан на рис. 1. Внутри корпуса размещается образец исследуемого топлива. Во время эксперимента давление измерялось с помощью датчика типа МД-60. Для визуального наблюдения и записи на видеокамеру процесса горения образца топлива в боковой стенке корпуса предусмотрено прозрачное окно из полиметилметакрилата. Перед окном установлена видеокамера. Образец топлива поджигался нихромовой проволокой с использованием воспламенительной пасты, нанесенной на поверхность проволоки. Во избежание разрушения модельной камеры из-за повышения давления предусмотрен предохранительный клапан.

На рис. 2 схематически приведено взаимодействие систем измерения и визуализации с объектом испытаний — модельной камерой, в которой размещен заряд твердого топлива 6. В процессе горения заряда основными регистрируемыми параметрами являются давление, измеряемое с помощью датчика давления 3, и температура, измеряемая термомпарой 4. Запись процесса горения на видеокамеру 7 “Panasonic” осуществляется через прозрачную переднюю стенку 8 с одновременной регистрацией звука и изображения. Сигналы с датчиков поступают на плату сопряжения 2 типа L-305, где они преобразуются из аналогового в цифровой код, который записывается и обрабатывается на компьютере 1. Видеоизображение и звук оцифровываются с помощью платы обработки видеоизображения 9 типа Miro-Dc10+.

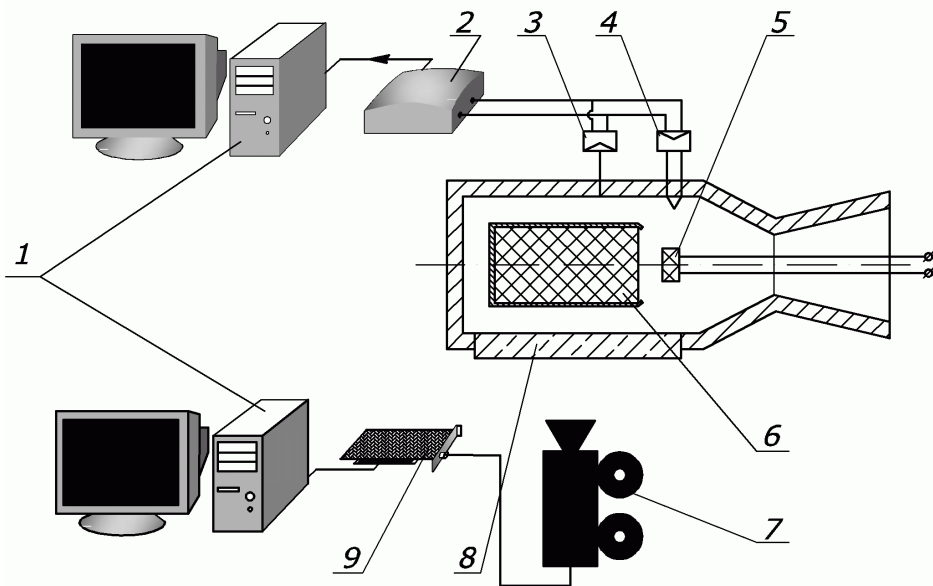


Рис. 2. Схема системы измерения и визуализации

Методика визуализации внутрикамерных процессов. Система регистрации и обработки изображения включает в себя аппаратные и программные составляющие. Аппаратно-программный комплекс состоит из исследуемого объекта (внутренний объем камеры сгорания, истекающая из сопла струя продуктов сгорания, образцовая температурная лампа и т.д.); видеокамеры, фиксирующей изображение и имеющей определенные программируемые цифровые эффекты и настройки. Например, можно регистрировать негативное изображение, устанавливать светофильтры, разрешать или отменять автоматическую установку фокуса и т.д.; системы оцифровки видеоизображения (в данном исследовании используется специализированная карта обработки видеосигнала Miro-DC10+, устанавливаемая на материнской плате компьютера); системы хранения оцифрованного изображения с программным обеспечением карты обработки видеосигнала Miro-DC10+ на жестком диске в формате AVI.

Определение температурных полей с помощью компьютерной обработки изображения. Исследуемым объектом в настоящей работе является истекающая из сопла струя продуктов сгорания РДТТ. Особенность заключается в световом излучении объекта, спектр которого аналогичен спектру серого тела [1]. При этом яркости отдельных элементов фиксируемого изображения могут отличаться на несколько порядков. На рис. 3 приведен кадр из видеосъемки запуска микро-РДТТ.

Следующий этап — это цифровая обработка видеоизображения с помощью платы видеозахвата Miro-DC10+.



Рис. 3. Исходное черно-белое изображение

Оцифрованное черно-белое видеоизображение обрабатывалось при помощи следующего программного обеспечения: 1. Пакета Virtual Dub, при помощи которого проводили все основные преобразования (причем, в этой программе должен быть установлен фильтр “Pseudocolor”, позволяющий заменять цвета в каждом кадре видеоролика в соответствии с выбранной палитрой); 2. Программы Adobe Photoshop, в которой создается файл палитры; 3. Программы “Конвертер палитры”, которая преобразует созданную пользователем палитру в файл данных для фильтра Pseudocolor; 4. Прикладной программы AVIedit, с помощью которой выбранные кадры из видеоролика преобразуются в графические изображения в формате BMP.

Для того чтобы определить качественное положение температурных полей, необходимо обработать видеофрагмент или отдельный кадр. Суть преобразований состоит в следующем: по градациям серого создается шкала цветности, где каждому новому цвету соответствует определенная степень серого. Таким образом, создается шкала соответствия цветов, приведенная на рис. 4.

Цифры обозначают границы на шкале серого цвета, по которым и задается цвет. Количество цветов на шкале и их значение определяются экспериментально в зависимости от оптимального сочетания и информативности получаемого изображения.

Далее шкала преобразуется в таблицу соответствия цветов с помощью программы “Конвертер палитры”. Созданный файл — это основ-

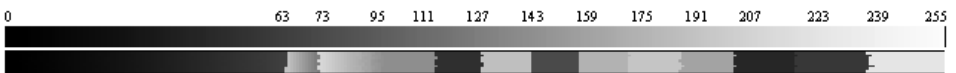


Рис. 4. Градуировочные черно-белый и цветной клинья

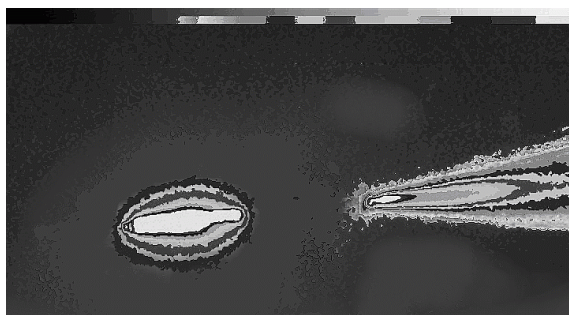


Рис. 5. Обработка видеоизображений огневого испытания РДТТ

ной инструмент для фильтра Pseudocolor. В прикладном пакете видеопереработки Virtual Dub загружается черно-белое изображение, устанавливаются настройки, необходимые для очистки изображения от шумов, помех и ошибок оцифровки, а также дополнительные фильтры для оцвечивания и наложения спецэффектов.

С помощью программы AVledit можно экспортировать из видеоролика выбранные кадры для дальнейшей обработки. Примеры обработанного отдельного кадра в режиме наложения псевдоцветового на черно-белое изображение приведены на рис. 5.

Методика калибровки ПЗС-¹ матрицы видеокамеры и выделения уровня полезного сигнала. На основе полученного анализа метрологических возможностей оптико-электронной системы обработки изображения был проведен эксперимент по замеру температуры тела накала образцовой лампы типа СИ8-200У при различных значениях тока. На рис. 6 приведена зависимость уровней серого видеоизображения

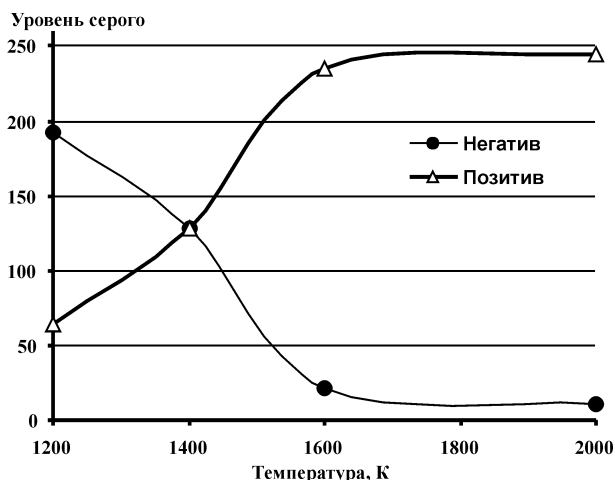


Рис. 6. Градуировочные характеристики образцовой лампы:

● — негатив; △ — позитив

¹Аббревиатура ПЗС означает “приборы с зарядовой связью” — этот термин образовался от английского “charge-coupled devices” (CCD).

эталонной лампы от яркостной температуры вольфрамового тела накала. Из рисунка видно, что оптимальным является диапазон яркостных температур 1200 . . . 1600 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.

Выводы. 1. Разработаны методики оптико-электронной обработки видеоизображений внутрикамерных процессов на основе цифровых технологий.

2. Разработана методика калибровки и практического использования полезного сигнала видеоизображения по уровню засветки ПЗС-матрицы видеокамеры, определяемого яркостной температурой объекта излучения.

3. Выполненные предварительные экспериментальные исследования подтвердили принципиальную возможность использования методов визуализации для огневых испытаний РДТТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев В. М., Мальцев М. И., Кашпоров Л. Я. Основные характеристики горения. – М.: Химия, 1977. – 320 с.
2. Кадышев А. Е. Измерение температуры пламени. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 218 с.
3. Температура факела жидкостного реактивного двигателя / Н.М. Соболев, Н.М. Белоусов, Г.М. Родин и др. // Журнал технической физики. – 1959. – Т. 29, № 1. – С. 27–36.
4. Специализированная автоматическая оптико-электронная система реального времени для анализа высокотемпературных тепловых полей / В.И. Мещеряков, В.Г. Денисов, А.В. Мазур, Н.И. Глухов // Актуальные вопросы физики аэродисперсных систем: Тез. докл. XXIV Всес. конф. – Одесса: ОГУ, 1986. – Т. 2. – С. 144.
5. Price E. W. Combustion on metallized propellants // Fundamental solid-propellant combustion. – New York, 1984. – P. 479–513.

Статья поступила в редакцию 28.12.2004

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 свыше 90 научных работ в области теории горения и диагностики рабочих процессов в ракетных двигателях и энергетических установках.

D.A. Yagodnikov (b. 1961) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1984. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 90 publications in the field of theory of combustion and diagnostics of working processes in rocket engines and power units.

Теплинский Михаил Викторович родился в 1981 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Аспирант кафедры “Ракетные двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области исследования рабочих процессов в ракетных двигателях.

M.V. Teplinsky (b. 1981) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 2004. Post-graduate of “Rocket Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of study of working processes in rocket engines.