

О ВОЗМОЖНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ЖРДМТ С ПОМОЩЬЮ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ СИСТЕМЫ

© 2011 В. В. Рыжков, М. В. Силютин

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

В настоящее время все более широкое применение находят инфракрасные тепловизионные системы в науке, технике и технологии, которые позволяют визуализировать, обрабатывать и отображать измерительную информацию, характеризующую процессы, происходящие с выделением тепла. В работе представлены результаты использования подобных систем для исследования и отработки теплового состояния ЖРДМТ.

Жидкостный ракетный двигатель малой тяги, инфракрасная тепловизионная система, тепловое состояние конструкции.

При создании жидкостных ракетных двигателей малой тяги одной из ключевых проблем является отработка теплового состояния двигателя – обеспечение соответствия максимальной и допустимой температуры стенки двигателя, определяемой свойствами используемого конструкционного материала. Как правило, заключительный этап этой работы проводится на стадии экспериментальной отработки ЖРДМТ, когда необходимо получить информацию о температурных полях двигателя с учетом всех мероприятий, направленных на обеспечение теплового состояния конструкции. До недавнего времени для решения этой задачи использовались специальные термопары – локальные контактные средства измерения. В связи с применением в ЖРДМТ современных жаропрочных конструкционных материалов, таких как молибден, ниобий и сплавов на их основе с покрытием, возникает потребность в освоении бесконтактных способов определения теплового состояния двигателей. Перспективными устройствами для этих целей следует считать инфракрасные тепловизионные системы.

Термин «тепловидение» относится главным образом к регистрации теплового излучения твердых тел, которое складывается из собственного излучения тела, обусловленного его температурой, а также отраженного и прошедшего излучения других тел.

Для оптически непрозрачных объектов тепловизионные устройства фиксируют исключительно поверхностные эффекты: температуру поверхности и величину коэффициентов излучения (поглощения) и отражения.

Математическую основу тепловидения составляют законы теплового излучения Планка, Вина и Стефана-Больцмана [1].

Принятая терминология, краткое описание тепловизионной техники и областей её применения представлены в [2, 3].

К основным параметрам, характеризующим тепловизионную систему, можно отнести следующие:

Диапазон температур тепловизора – определяет предельные температуры, которые способен измерять и записывать тепловизор.

Температурная чувствительность тепловизора – характеризует чувствительность тепловизора к разнице температур между двумя соседними точками (чем ниже этот показатель, тем выше разрешающая способность прибора и тем лучше качество снимка).

Частота обновления кадров тепловизора – информирует о том, сколько раз в секунду происходит обновление кадров на дисплее тепловизора (чем выше этот показатель, тем лучше качество картинки на экране прибора).

Матрица тепловизора – определяет разрешающую способность тепловизора.

Функция определения минимальной/максимальной температуры объекта – эта функция полезна для определения температурных аномалий.

Наличие в тепловизоре встроенной цифровой камеры.

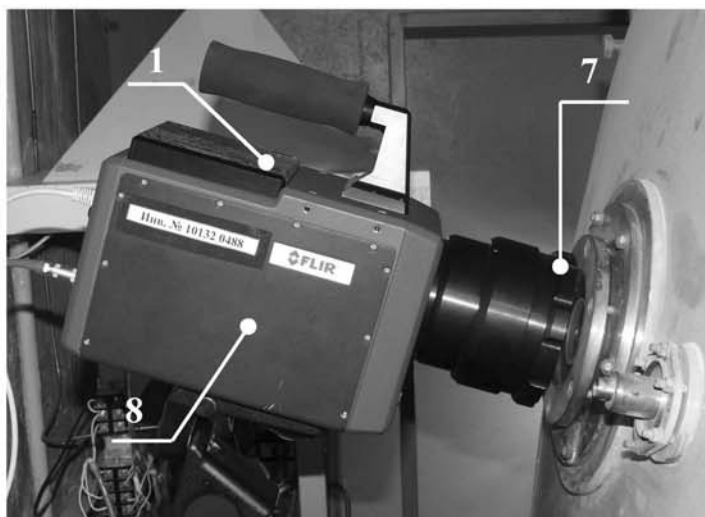
Используемая в работе инфракрасная тепловизионная система (рис. 1) создана под широкий спектр научных задач, для которых важны высокие технические характеристики, такие как: температурный диапазон, температурная чувствитель-

ность, точность измерений, разрешение сенсора, скорость сбора данных и другие.

Система обладает рядом преимуществ по сравнению с другими аналогичными средствами измерений, основные из которых следующие:

- выбор инфракрасных детекторов для различных задач;
- настраиваемый оптический интерфейс;

- интеллектуальное управление с расширенными возможностями;
- автоматизированная система смены фильтров;
- интерфейсы CAMLINK/USB2/GigE с поддержкой Plug&Play;
- синхронизация съемок с внешними аналоговыми сигналами;
- термографический анализ с помощью программы Altair и др.



а



б

Рис. 1. Инфракрасная тепловизионная система:

1 – детектор, 2 – разъем для записи данных через CAMLINK интерфейс, 3 – выход для аналоговых сигналов управления, 4 – выход для видеосигнала, 5 – выход для управляющих сигналов, 6 – интерфейс GigE, 7 – сменная оптика с системой фильтров, 8 – алюминиевый корпус

Система включает следующие элементы:

- современные FPA детекторы с эффективным охлаждением;
- выход для высокоскоростной записи данных через CAMLINK интерфейс;
- выход для аналоговых сигналов управления;
- выход S-Video для видеосигнала высокого качества;
- выход для управляющих сигналов с низким уровнем шумов;
- интерфейсы USB2/GigE на выбор;
- сменная оптика со встроенной системой замены фильтров;
- жесткий литой алюминиевый корпус.

Основные технические характеристики тепловизионной системы следующие.

- измерение температуры в диапазоне $-20...2500^{\circ}\text{C}$;
- точность измерений $-\pm 1^{\circ}\text{C}$ (или $\pm 1\%$);
- температурная чувствительность не менее 1 К;
- спектральный диапазон 3-5 мкм;

- разрешение изображения 640x512 / 14 бит;
- максимальная частота обновления полных кадров – не менее 100 Гц (с возможностью увеличения до 3000 Гц);
- время интегрирования – от 3 мкс;
- работа в диапазоне температур – от -20°C до $+55^{\circ}\text{C}$;
- входное напряжение – сетевой адаптер переменного тока +12VDC/аккумуляторное питание;
- потребляемая мощность 30 Вт;
- сменная оптика с системой фильтров;
- вход для внешних управляющих сигналов;
- цифровой выход - USB2, Camlink, GigE;
- синхронизация съемки с внешними аналоговыми сигналами;
- термографический анализ с помощью специального программного обеспечения.

Программное обеспечение тепловизионных систем в значительной мере определяет их возможности.

Программные средства обеспечивают согласование тепловизора с компьютером, стандартную или специализированную обработку изображений и отображение измерительной информации, что позволяет использовать не только отдельно тепловизор, но компьютерную термографическую систему.

Компьютерные программы позволяют проводить анализ термограмм, в частности, изменять основные установки тепловизора (коэффициент излучения, диапазон измерения и т.д.), определять среднюю температуру в областях различной конфигурации, строить профили, изотермы, диаграммы, гистограммы и т.п. Программы дают возможность пользоваться стандартными функциями среды Windows, что делает их гибкими при написании и редактировании всевозможных документов. Последние версии позволяют работать сразу с несколькими изображениями.

«Altair» представляет собой программу, предназначенную для обработки изображений, полученных с помощью инфракрасных камер. Благодаря передовым технологиям, программа обеспечивает возможность просмотра последовательности изображений в режиме реального времени и сохранения их со скоростью 200 кадров в секунду. В сочетании с другими компонентами программного обеспечения она может использоваться для управления режимом съемки и последующей обработки изображения.

Свойства текущего кадра сохраняются как данные, которые могут отображаться в любое время при вызове меню.

С помощью меню можно выбирать единицы измерения, существуют возможности по выбору опции вычисления значения теплового потока, можно регулировать: пороговое значение экстраполяции диапазона температур, выбирать интерфейс температурного диапазона и др., имеется возможность отображения или скрытия различных элементов рабочей области, возможно масштабирование изображения в широком диапазоне и области анализа различной конфигурации.

Измеряются следующие величины: цифровой уровень, температура, яркость, специальная единица, специальная единица калибровки, тепловой поток.

С помощью программы «Altair» можно размещать дополнительные функции путем пополнения библиотек данных.

Для определения температуры с помощью тепловизионной камеры используют специальные калибровки, которые проводят на абсолютно черных телах с записью информации в память камеры. Проведенные в идеальных условиях индивидуальные калибровки для используемой в работе инфракрасной тепловизионной системы в качестве примера показаны на рис. 2 в координатах: время интегрирования сигнала от источника излучения и температура источника. На рисунке представлены результаты калибровки системы в диапазоне температур 500...2500°C в виде трех зависимостей, в каждом из диапазонов, отличающихся областями низких, высоких и промежуточных температур. Причем камера автоматически выбирает требуемую градуировку после задания времени интегрирования сигнала.

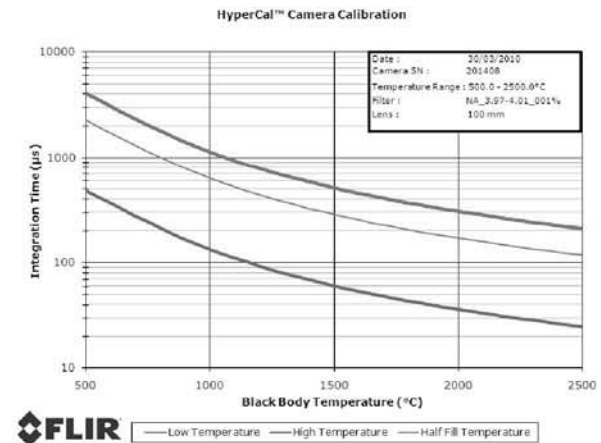


Рис. 2. Результаты градуировки ИК тепловизионной системы в диапазоне температур 500...2500°C

Представляют интерес результаты апробации и отладки инфракрасной тепловизионной системы на моделях и в условиях более простых, чем ЖРДМТ и их натурные испытания в вакуумных камерах.

В качестве объекта использована лампочка накаливания, расположенная в атмосферных условиях.

При этом решаются задачи: освоение методики применения тепловизионной камеры для измерения температуры (распределение температуры) объекта, приобретение опыта использования ряда опций и возможностей камеры, необходимых при измерении температуры, собственно опре-

деление температуры (распределения температуры), отображение полученных результатов.

Общий вид объекта, температура которого подлежит определению, после выделения области, представляющей интерес, масштабирования, исключения воздействия промежуточных объектов и др. операций (спираль лампы накаливания, как объект определения температуры) показан на рис. 3.

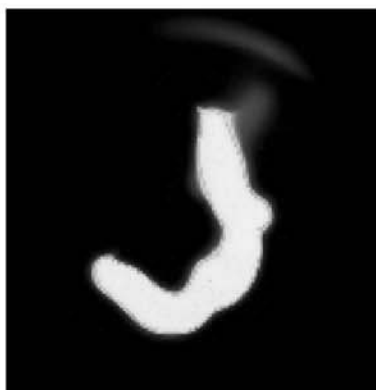


Рис. 3. Вид источника теплового излучения после выделения исследуемой области и фильтрации фона от посторонних источников

Измерительная информация – временная диаграмма источника излучения, приведена на рис. 4.

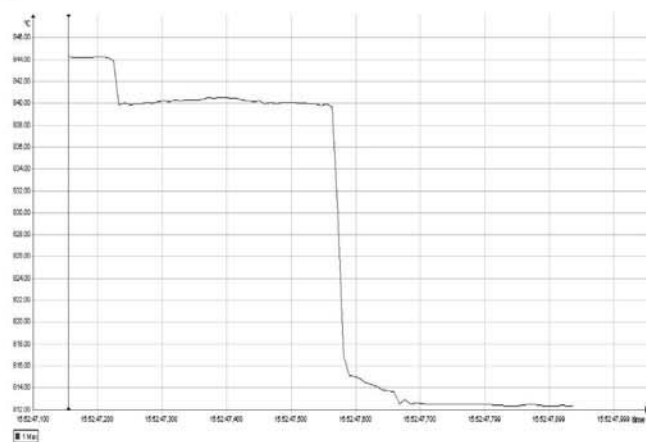


Рис. 4. Временная диаграмма источника излучения в заданной области определяющих параметров

Для дальнейшего важным является определение влияния на результат измерения температуры сапфирового окна, которое разделяет реальный объект исследования, расположенный в вакуумной камере, и тепловизионную систему. На рис. 5 показано влияние, а точнее отсутствие такового, на показания системы измерения с использованием тепловизора в рабочем диапазоне изменения длины волны излучения объекта (см. рис. 5,а,б).



а



б

Рис. 5. Влияние сапфирового окна на измерение температуры

В работе в качестве объектов исследования, требующих оценки теплового состояния конструкции, использовались перспективные жидкостные ракетные двигатели малой тяги, находящиеся в разных стадиях отработки.

В процессе исследований и испытаний ЖРДМТ решались следующие задачи, основанные на функциональных характеристиках инфракрасной тепловизионной системы:

- определение распределения температуры на внешней поверхности двигателя;
- выявление и локализация зон с максимальной температурой поверхности, оценка её величины;
- получение диаграмм максимальной температуры объекта и температурного поля в целом;
- локализация интересующей области и запись изменения температуры в её границах;
- определение температуры изделия по заданным сечениям, направлениям, пространственным координатам;
- использование тепловизионных камер в демонстрационном эксперименте, в системах аварийного выключения двигателя и некоторые другие.

Поскольку современные ЖРДМТ представляют собой однослойные конструкции, выполненные, как правило, из жа-

ропрочных материалов, то в них наиболее прямая связь между регистрируемой тепловизором температурой наружной поверхности и процессами, происходящими в камере двигателя.

На рис. 6-8 представлена тепловизионная информация, полученная на начальной стадии отработки кислородно-водородного РДМТ Р~100Н.



а



б



в

Рис. 6. Картины распределения температуры наружной поверхности кислородно-водородного РДМТ Р~100Н в начальный период (а), в период развития процесса (б) и перед остановом двигателя (в)

На рис. 6 показаны картины распределения температуры поверхности двигателя, которые могут быть воспроизведены в любой момент времени в течение пуска и представляющие общую качественную и количественную информацию о развитии тепловых процессов в камере сгорания и сопле ракетного двигателя.

Представляет интерес динамика распространения температурного фронта в процессе запуска двигателя и далее до установившегося теплового состояния. Особенно это важно при одиночных включениях ЖРДМТ и импульсной работе двигателя. Положение области с максимальной температурой стенки двигателя, особенно в ЖРДМТ, зависит от большого числа факторов и часто отличается от классического случая. Для исследуемого РДМТ эта область расположена в районе смесительной головки (рис. 7), а зависимость максимальной температуры от времени показана на рис. 8.

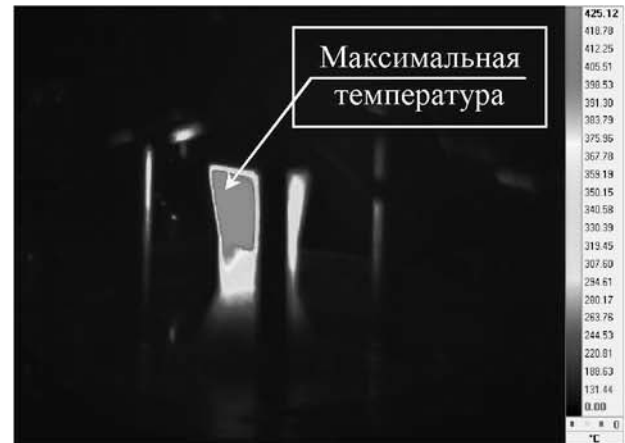


Рис. 7. Зона максимальной температуры на поверхности кислородно-водородного РДМТ Р~100Н

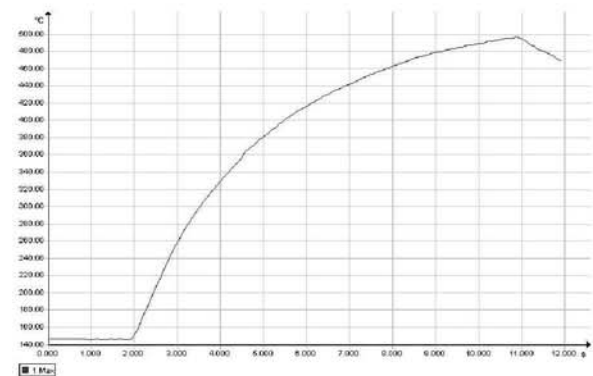


Рис. 8. Зависимость максимальной температуры наружной поверхности кислородно-водородного РДМТ Р~100Н от времени

Полученная тепловизионная информация, кроме самостоятельного значения, позволяет по совокупности параметров характеризовать рабочий процесс в РДМТ Р~100Н как ненапряженный, требующий принятия конструктивных мер, направленных на совершенствование процессов, в первую очередь, смесеобразования.

Существенно более теплонапряженное состояние зарегистрировано на кислородно-водородном РДМТ Р~25Н. Результаты в виде зависимостей максимальной температуры стенки двигателя от времени представлены на рис. 9,а,б,в.

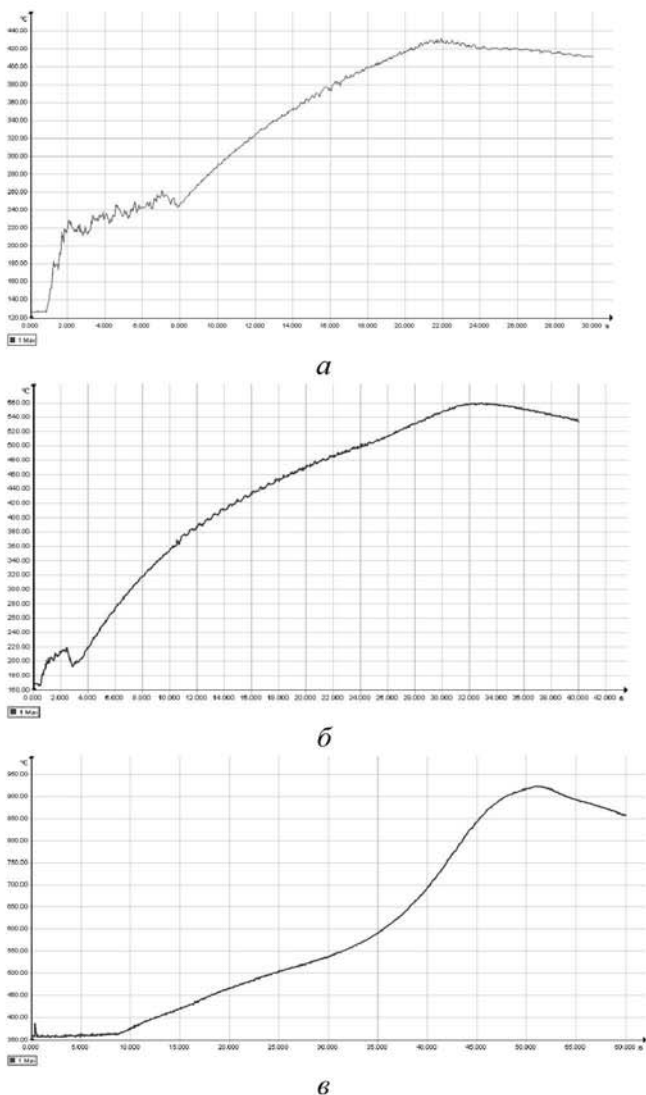


Рис. 9. Зависимость максимальной температуры камеры РДМТ Р~25Н от времени

Обращает на себя внимание характер поведения зависимостей $t_{cm}^{max} = f(\tau)$. Данные, представленные на рис. 9,а,б, позволяют прогнозировать возможный выход максимальной

температуры стенки РДМТ на установившийся тепловой режим двигателя, а результаты (рис. 9,в), полученные на пятидесятисекундном пуске, а именно – резкий рост температуры при длительностях $\tau_{вкл} > 30$ с до момента выключения двигателя, указывают на неизбежный прогар камеры. Останов двигателя произведен при достижении допустимой температуры стенки конструкции ($t_{cm}^{доп} \approx 1000^\circ\text{C}$).

Выявленные особенности изменения температуры стенки РДМТ позволяют предположить, что при проектировании двигателя недостаточное внимание уделено обеспечению теплового состояния конструкции и требуется внесение изменений в схему ракетного двигателя малой тяги.

Часто приходится получать тепловизионную информацию о части объекта исследования с последующей реконструкцией всего теплового поля. Это может быть обусловлено особенностями ЖРДМТ: постановкой теплозащитных экранов, условиями их испытаний, затенением объекта элементами стендовых систем, взаимным расположением двигателя и тепловизора (при испытаниях в вакуумных камерах) и другими причинами.

В связи с этим исследования ЖРДМТ в этом случае имеют определенную специфику.

На рис. 10 показана тепловизионная картина ЖРДМТ Р~25Н на компонентах НДМГ+АТ в пределах окна теплозащитного экрана, а на рис. 11 приведено распределение максимальной температуры стенки по времени этого же двигателя.

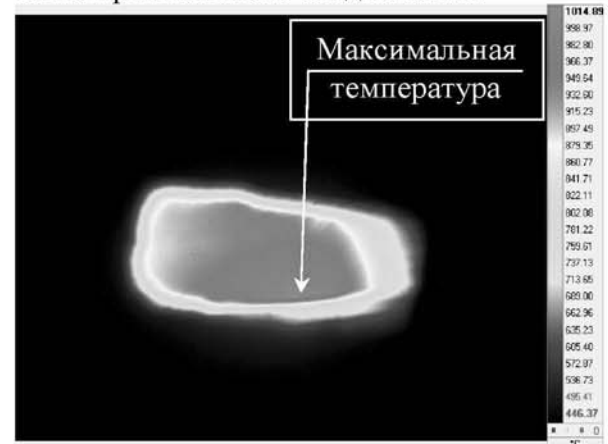


Рис. 10. Распределение температуры в пределах окна теплозащитного экрана ЖРДМТ на компонентах топлива НДМГ+АТ, Р~25Н

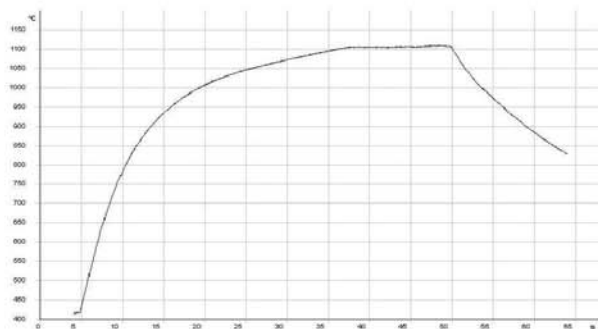


Рис. 11. Распределение максимальной температуры камеры ЖРДМТ на компонентах НДМГ+АТ, P~25Н

Максимальная зарегистрированная установившаяся температура ЖРДМТ составила $t_{ст}^{max} = 1108^{\circ}C$.

Представляет интерес распределение температуры в характерных поперечных сечениях и продольном направлении вдоль оси двигателя (рис. 12).

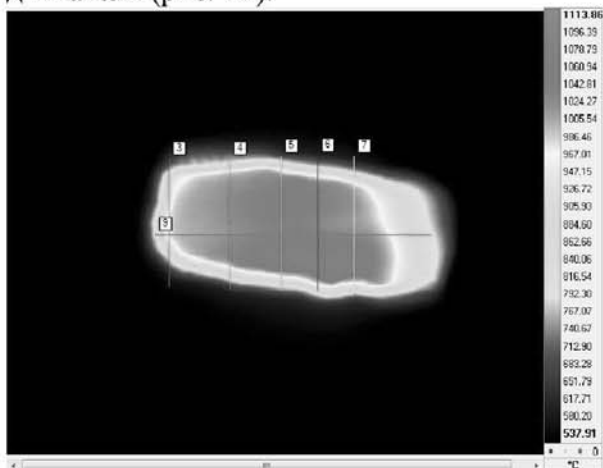


Рис. 12. Расположение сечений, в которых исследуется распределение температур

Информация о подобном распределении представлена на рис. 13 и 14.

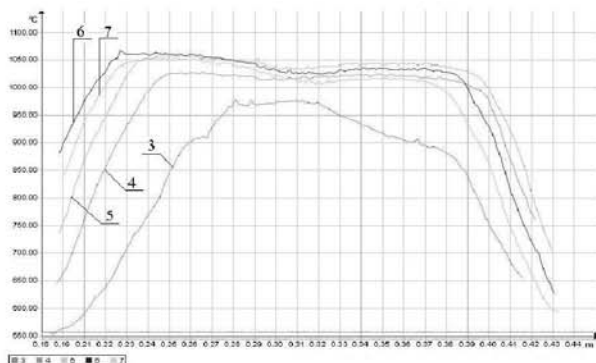


Рис. 13. Распределение температуры стенки в поперечных сечениях ЖРДМТ на компонентах топлива НДМГ+АТ, P~25Н

Следует иметь в виду, что полезная информация об объекте исследования сосредото-

чена в пределах координат от $X_1=25$ мм до $X_2=39$ мм (рис. 13), где имеет место относительно равномерное распределение температуры вдоль цилиндрической образующей наружной стенки сопла Лавала ЖРДМТ, а её уровень позволяет говорить о достаточной напряженности рабочего процесса. В то же время запас по температуре как разница между допустимой и реальной температурой стенки двигателя ($\Delta t \approx 700^{\circ}C$) переразмерен, что допускает совершенствование рабочего процесса ЖРДМТ на последующих этапах обработки изделия.

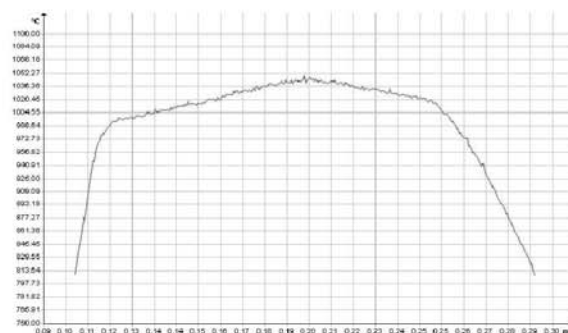


Рис. 14. Распределение температуры стенки в продольном направлении ЖРДМТ на компонентах НДМГ+АТ, P~25Н

Таким образом, в работе показаны некоторые новые возможности, которые предоставляют инфракрасные тепловизионные системы в процессе отработки современных ЖРДМТ. Причем с помощью тепловизионной информации, кроме прямой оценки теплового состояния конструкции, в ряде случаев удастся наметить направления модернизации исследуемых двигателей либо в части совершенствования схемы смесеобразования, либо внесения конструктивных изменений в смесительную головку для обеспечения температуры камеры двигателя менее допустимой температуры стенки.

Библиографический список

1. Госсорг, Ж. Инфракрасная термография: основы, техника, применение [Текст] / Ж. Госсорг. – М.: Мир, 1988. – 396с.
2. ГОСТ 25314-82. Контроль неразрушающий тепловой. Термины и определения [Текст]. – М.: Изд-во стандартов, 1982.
3. Вавилов В.П., Тепловизоры и их применения [Текст] / В.П. Вавилов, А.Г. Климов. – М.: Интел универсал, 2002. – 88с.

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF THERMAL CONDITIONS LREST USING AN INFRARED THERMAL IMAGING SYSTEM

© 2011 V. V. Ryzhkov, M. V. Silyutin

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

Currently, the increasing use of infrared thermal imaging systems are in science, engineering and technology, which allows to visualize, process and display measurement information characterizing the processes taking place with heat. The results of the use of such systems for research and testing of the thermal state LREST.

Liquid rocket engine small thrust, an infrared thermal imaging system, the thermal state of the structure.

Информация об авторах

Рыжков Владимир Васильевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель научно-исследовательского центра космической энергетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-45-92. E-mail: ke_src@ssau.ru. Область научных интересов: рабочий процесс ракетных двигателей малой тяги.

Силютин Максим Владимирович, ассистент кафедры теории двигателей летательных аппаратов, инженер научно-исследовательского центра космической энергетики, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Тел.: (846) 267-45-92. Область научных интересов: термогазодинамические процессы в жидкостных ракетных двигателях.

Ryzhkov Vladimir Vasilevich, Candidate of technical Sciences, Senior Research Fellow, Head of NIC KE, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Phone: (846) 267-45-92. E-mail: ke_src@ssau.ru. Area of research: workflow rocket thrusters.

Silyutin Maxim Vladimirovich, assistant department theory of aircraft engine, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University). Area of research: thermogasodynamic process in liquid rocket engine.