

ОПЫТ И ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

В.А. Товстоног

*Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, 105005, 2-я Бауманская ул., д.5*

Аннотация

Рассмотрены технические возможности применения трубчатых водоохлаждаемых источников излучения при высокотемпературных тепловых испытаниях материалов и конструкций и проблемы, связанные с бесконтактным измерением температуры нагреваемой поверхности в условиях сильного фонового излучения источников нагрева.

EXPERIENCE AND PROBLEMS OF EMISSION SOURCES APPLICATION DURING THERMAL TESTS OF HEAT-STRESSED CONSTRUCTIONS

V.A. Tovstonog

Bauman Moscow State Technical University, Russia, Moscow, 105005

Technical possibilities of emitting sources with pipes water-cooling application were examined in high temperature heating tests of materials and constructions as well as problems, linked with noncontact measurements of heated surface in strong background emission of heating source.

1. ВЕДЕНИЕ

Сложность и высокая стоимость испытаний аэрокосмических конструкций в условиях высокотемпературного аэродинамического нагрева обуславливает необходимость разработки методов и средств наземных тепловых испытаний. При этом, если высокотемпературный нагрев образцов материалов или малоразмерных элементов конструкции особой проблемы не представляет, то испытания крупногабаритных моделей или фрагментов конструкции сопряжено с преодолением ряда технических и технологических трудностей. Например, тепловые испытания крупногабаритных моделей-демонстраторов гиперзвуковых летательных аппаратов, предназначенных для полетов в относительно плотных слоях атмосферы со скоростями Маха $M=5 \div 10$, требует создания средств нагрева до $2000 \div 2500$ К поверхностей с характерным размером в десятки сантиметров при времени воздействия, измеряемом десятками минут. Реализация таких параметров нагрева на газодинамических установках представляет весьма сложную техническую задачу.

2. АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ МЕТОДЫ НАГРЕВА

Одним из альтернативных методов нагрева можно рассматривать радиационный нагрев с использованием искусственных источников излучения. Этот метод нашел широкое применение при тепловых испытаниях космических аппаратов с использованием газоразрядных шаровых ламп высокого давления [1] и авиационных конструкций с использованием трубчатых галогенных ламп накаливания [2]. Однако применительно к тепловым испытаниям гиперзвуковых летательных аппаратов эти источники излучения по многим параметрам не могут обеспечить требуемых режимов нагрева. Проведенный анализ показывает [3], что для решения этой технической задачи наибольшие воз-

можности обеспечивает использование трубчатых водоохлаждаемых газоразрядных источников излучения (ГИИ). Одна из возможных схем установок для тепловых испытаний моделей-демонстраторов гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) приведена на рис. 1.

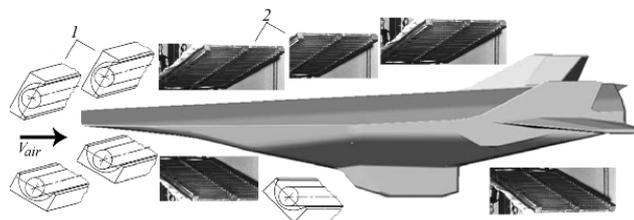


Рис.1. Схема рабочего участка зонного нагрева крупногабаритных конструкций (1 – блоки ГИИ, 2 – блоки ГЛН)

Здесь для нагрева наиболее теплонапряженных участков конструкции – носка, кромок крыльев, кия и воздухозаборника, могут быть использованы ГИИ, а для менее теплонапряженных – галогенные лампы накаливания (ГЛН).

Предлагаемая концепция основана на многократном форсировании мощности изготавливаемых по опытной технологии промышленных ГИИ типа ДТП10–200 и ДТП10–500. Конструкция источника излучения представляет собой сборку (рис. 2), содержащую газонаполненную разрядную колбу из высококачественного кварцевого стекла 1 с впаянными электродами из легированного вольфрама, помещенную во внешнюю оболочку 2 из кварцевого стекла. Токоподводы 3 одновременно служат и узлами подвода охлаждающей жидкости (обычно воды), протекающей в зазоре между колбой и внешней оболочкой. Работоспособность ГИИ во многом связана с температурным режимом наиболее теплонапряженных элементов конструкции – электродов и колбы, а форсирование мощности приво-

дит к ужесточению их температурного режима, что, в конечном итоге, связано со снижением ресурса работы и ограничением предельных параметров – мощности и плотности потока излучения.

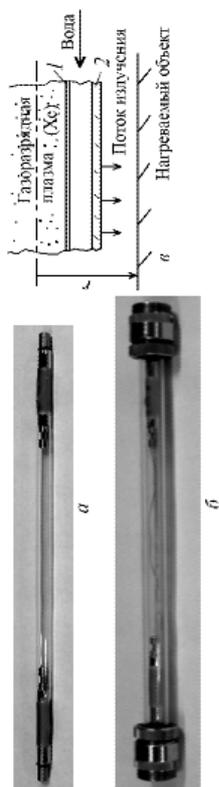


Рис. 2. Общий вид газоразрядного источника излучения ДТП10–200 (а), сборка источника излучения с внешней оболочкой и комбинированными узлами подвода хладагента/питающее напряжение (б) и схема сборки (в): 1 – источник излучения; 2 – внешняя оболочка; 3 – токопроводы

Проведенные исследования показывают, что наиболее критичным является температурный режим колбы и наиболее реальная возможность повышения предельных параметров ГИИ связана с уменьшением толщины стенки колбы вплоть до величины, лимитируемой прочностью и возможностями технологии изготовления. У серийных ГИИ типа ДТП10–200 толщина стенки колбы составляет 1.2 ÷ 1.3 мм и соответственно предельная мощность 80 ÷ 90 кВт (рис. 3, а).

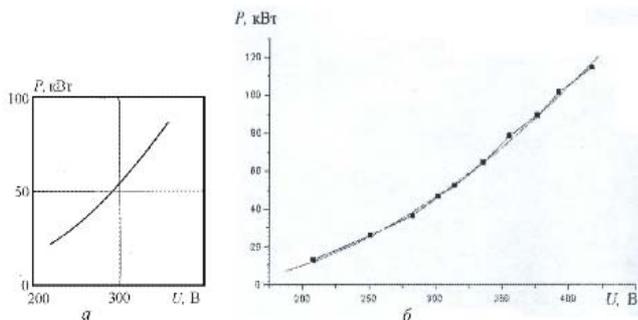


Рис.3. Зависимость электрической мощности источника излучения ДТП10/200 с толщиной стенки колбы 1.2 ÷ 1.3 мм (а) и 0.8 мм (б)

На опытных образцах ГИИ с толщиной стенки 0.8 мм достигнута мощность 125 ÷ 130 кВт (рис. 3,б) и соответствующее увеличение плотности потока излучения; опытные данные хорошо аппроксимируются полиномом

$$P = 5.551 - 0.202U + 0.00113U^2, \text{ кВт.}$$

Другим фактором, позволяющим повысить предельные параметры, является использование для оболочки ГИИ прозрачных материалов с большей, чем у кварцевого стекла теплопроводностью. Однако это требует проведения глубоких исследований в области материаловедения.

2. РЕГИСТРИРУЕМАЯ ИНФОРМАЦИЯ

В экспериментальных исследованиях важное значение имеет объем регистрируемой информации о параметрах испытываемого объекта. Применительно к тепловым испытаниям является температура или температурное поле на поверхности нагреваемого объекта. Этот параметр характеризует как теплонапряженное состояние нагреваемого объекта, так во многом определяет и протекание поверхностных процессов, связанных с активным взаимодействием материала конструкции с внешней средой. Если для измерения температуры поверхности термостабильных материалов с определенными ограничениями могут быть использованы контактные методы, то при активном взаимодействии нагреваемого объекта, например, элементов тепловой защиты с внешней тепловой нагрузкой, информация о температуре нагреваемой поверхности может быть получена только с использованием бесконтактных методов измерения [4], основанных на использовании законов излучения абсолютно черного тела (АЧТ). Эти методы дают возможность определить температуру нагретых тел несколькими способами - измерением полной энергии излучения (пирометрия полного излучения); измерением энергии, заключенной в определенном интервале длин волн (пирометрия частичного излучения) или в узком спектральном интервале; измерением отношения энергий в двух или более спектральных интервалах [5]. Так как излучение реальных объектов отличается от излучения АЧТ, то измеренная указанными способами температура, даже в отсутствие внешних помех, будет отличаться от действительной, т.е. использование законов излучения АЧТ позволяет определить некоторые условные температуры, переход от которых к истинным требует знания излучательных характеристик нагреваемого объекта.

Если нагреваемый объект имеет спектрально-селективные излучательные характеристики, то наиболее удобным является метод оценки температуры поверхности по измерениям яркостной температуры на определенной длине волны λ излучения, в соответствии с которым связь между истинной T и яркостной T_λ температурами выражается формулой

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_\lambda} + \frac{\lambda}{C_2} \ln \varepsilon_\lambda, \tag{1}$$

где ε_λ – спектральная излучательная способность на длине волны измерения λ , мкм; $C_2 = 14388 \text{ мкм} \cdot \text{К}$.

Анализ показывает, что если $\varepsilon_\lambda \geq 0.5$ и $\lambda = 0.5 \div 1$ мкм, то по яркостной температуре с точностью $\approx 10\%$ можно судить об истинной температуре нагретого тела. Из анализа формулы (1) следует, что различия между истинной и яркостной температурами уменьшаются при смещении рабочей длины волны пирометра в коротковолновую область. Так, например, при температуре нагретого тела 2000 К и излучательной способности $\varepsilon_\lambda = 0.4$ различия между истинной и яркостной температурами составляют: 110 К при $\lambda = 0.45$ мкм; 155 К при $\lambda = 0.66$ мкм и 225 К при $\lambda = 1.0$ мкм. А так как излучательная способность чаще всего величина неизвестная, измерения яркостных температур обычно проводят в коротковолновой области спектра.

Наиболее распространенным прибором для точного измерения яркостных температур является оптический пирометр с исчезающей нитью, в котором для монохроматизации излучения объекта используют светофильтр, выделяющий узкий спектральный участок $\Delta\lambda \approx 0.02$ мкм. Яркостную температуру оценивают при сравнении излучения объекта и излучения нити пирометра, отградуированной по образцовым излучателям (черному телу или образцовой температурной лампе).

В практике теплофизических исследований, особенно объектов с развитой поверхностью, чаще всего интерес представляет измерение не локальной температуры, а поля температур на поверхности нагреваемого объекта. Применения систем сканирования не всегда возможно и к тому же приводит к значительным техническим трудностям при измерении нестационарных температур. В то же время применение метода фотопирометрии, в основу которого положена фотографическая регистрация (панорамная съемка) поверхности излучающего тела с последующим сопоставлением плотности почернения фотоматериала с плотностью его почернения от действия излучения образцового излучателя, позволяет получить информацию о поле температур на нагретой поверхности с использованием достаточно простого оборудования [6, 7] и методики микрофотометрирования [8]. Так при использовании в качестве регистратора кинокамеры можно получить информацию о нестационарном поле температур на поверхности нагреваемого объекта. Измерение яркостной температуры фотопирометрическим методом может быть проведено в любом узком спектральном интервале, выделяемом набором светофильтров.

Если в качестве фокусирующей оптики фоторегистратора использовать пирометр с исчезающей нитью, то на одном и том же кадре будет регистрироваться как излучение нагретого объекта, так и излучение эталонного источника, которым служит (вторичный эталон) нить пирометра, отградуированная по образцовому излучателю. Схема такого кинопирометра приведена на рис. 4.

Он содержит эталонный оптический пирометр ЭОП-66, используемый в качестве приемника излучения, а его пирометрическая лампа служит образцовым (эталонным) источником, и кинокамеры, используемой для фотографической регистрации излучения.

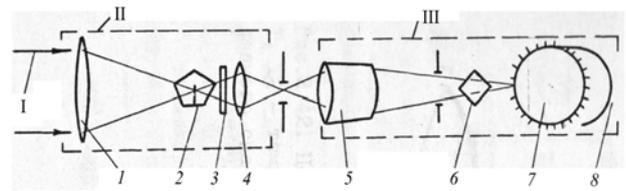


Рис.4. Схема кинопирометра, где I – излучение; II – оптический пирометр; III – кинокамера; 1 – объектив пирометра; 2 – пирометрическая лампа; 3 – фильтр; 4 – окуляр; 5 – объектив кинокамеры; 6 – развертка; 7 – барабан; 8 – пленка

Учитывая, что при такой схеме измерений излучение эталонного источника с известной яркостной температурой $T_{ЭЯ}$ и нагретого объекта с яркостной температурой $T_Я$ регистрируются в полностью идентичных условиях (на одном и том же кадре), а плотности почернений фотоматериала, ими вызываемые ($D_Э$ и D), в пределах линейного участка характеристической кривой связаны соотношением

$$\gamma = \frac{D - D_Э}{\lg(H/H_Э)},$$

где λ – коэффициент контрастности пленки, определяемый ее индивидуальной градуировкой (построением характеристической кривой); $H = Et \sim e^{-c_2/\lambda T}$ – экспозиция, E – освещенность пленки, t – время экспонирования, формула для определения яркостной температуры объекта, может быть записана в виде

$$T_Я = \frac{1}{\frac{1}{T_{ЭЯ}} + \frac{(D_Э - D)\lambda}{0.434C_1\gamma}}, \quad (2)$$

λ – длина волны, на которой проводятся измерения).

Задача бесконтактного измерения температуры тел, нагреваемых широкополосными источниками излучения, существенно осложняется тем, что яркостные температуры мощных источников излучения, таких как газоразрядная лампа, существенно превышают яркостную температуру нагреваемого объекта, и непосредственная регистрация его излучения в поле излучения источника нагрева становится практически невозможной. Это становится вполне очевидным, если сравнить спектральное распределение поверхностной плотности потока излучения источника нагрева и нагреваемого объекта, в качестве которого можно принять АЧТ при некоторой заданной температуре (рис. 5).

Такое положение приводит к необходимости применения методов регистрации излучения нагреваемых тел, учитывающих принципиальные особенности системы нагрева и излучения источников нагрева. Например, при использовании установок с широкополосными точечными источниками излучения, оснащенных концентраторами излучения (гелиоустановки, установки с дуговым разрядом или шаровыми газоразрядными лампами) измерения температуры можно проводить в моменты принудительного кратковременного прерывания потока излучения механическими отбюраторами [9].

Спектральная поверхностная плотность потока излучения ГИИ ДТП10/200 при мощности 70 кВт (1) и абсо-

лютно черного тела при температуре 3000 К (2) и 4000 К (3). На врезке показан спектр излучения ксенона.

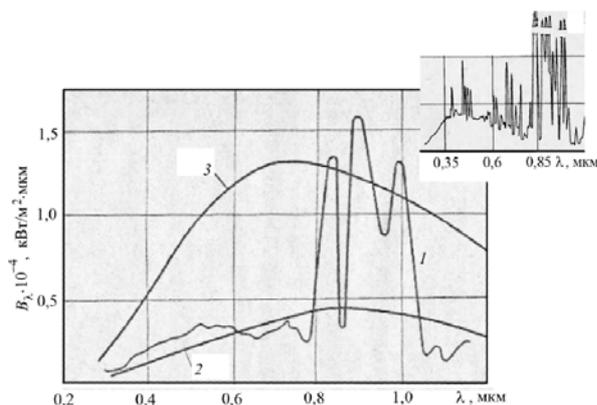


Рис.5. Спектральная поверхностная плотность потока излучения ГИИ ДТП10/200 при мощности 70 кВт (1) и абсолютно черного тела при температуре 3000 К (2) и 4000 К (3). На врезке показан спектр излучения ксенона

Однако такой подход трудно применим при использовании трубчатых газоразрядных источников излучения, типа ДТП10/200, нашедшего широкое применение в установках для тепловых испытаний материалов и конструкций [10]. Вместе с тем излучение источников, работающих на переменном токе, естественным образом промодулировано с удвоенной частотой питающего напряжения, так что в моменты обнуления (перезажигания) разрядного тока излучение источника в течение определенного промежутка времени отсутствует. На рис. 6 приведены осциллограммы разрядного тока и лучистого потока трубчатого источника излучения, работающего на переменном токе.

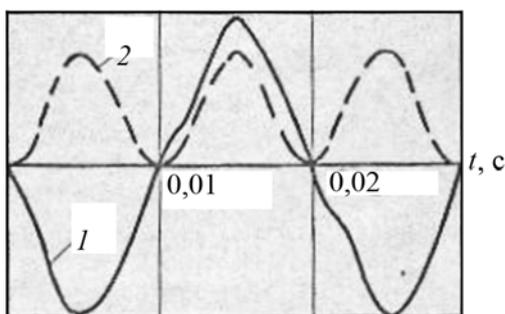


Рис.6. Осциллограмма разрядного тока и потока излучения ГИИ при работе на переменном токе частотой 50 Гц

Анализ осциллограмм показывает, что при частоте питающего напряжения 50 Гц длительность промежутка времени, свободного от излучения источника, составляет $\sim 10^{-3}$ с. Такое положение при соответствующей синхронизации времени регистрации излучения нагреваемого тела с моментами перезажигания источника нагрева позволяет использовать методы скоростной пирометрии для измерения температуры поверхности.

Наиболее просто этот метод может быть реализован с использованием скоростного кинопирометра в режиме непрерывной съемки. При этом не составляет труда для обработки отбирать кадры, свободные от

излучения источника нагрева. В качестве примера реализации этого метода на рис. 7 приведен кадр кинограммы нагрева стеклотекстолита излучением газоразрядного источника ДТП10/200.

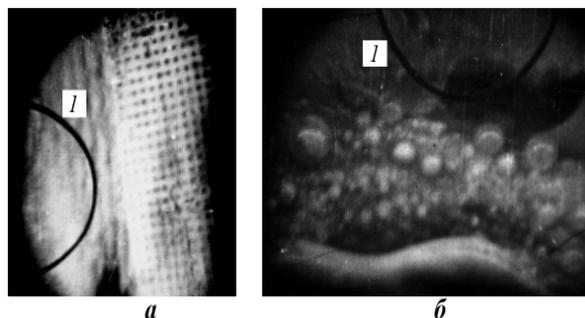


Рис.7. Кадры кинограммы нагрева стеклотекстолита излучением ГИИ в период формирования разрушающейся поверхности (а) и развитого уноса массы (б)

Микрофотометрирование позволило определить поле яркостных температур, которые для соответствующего этому кадру момента времени составляют величину $1740 \div 1840$ К. Существенно то, что использование этого метода позволяет зарегистрировать и визуальную картину происходящих процессов. В качестве примера на рис. 7, а приведено изображение поверхности стеклопластика в период формирования разрушающейся поверхности при действии потока излучения газоразрядного источника ДТП10/200, а на рис. 7, б – та же поверхность в режиме развитого уноса массы. Как видно, поверхность покрыта не пленкой, а сферическими частицами расплава диоксида кремния (скорость съемки 4000 кадра/с, т.е. время экспозиция $0,25 \times 10^{-3}$ с, что гарантирует полное отсутствие излучения источника на обрабатываемом кадре). Это связано с тем, что поверхность углерода (карбонизованного связующего) является несмачиваемой по отношению к расплаву. Микрофотометрирование приведенного на рис. 7, б кадра позволило определить поле яркостных температур и дать оценку яркостной температуры разрушаемой поверхности – $1750 \div 1850$ К.

Существенным недостатком метода кинофотопирометрии является большой расход фотоматериала, необходимость калибровки каждой партии пленки, а также учет возможности ее старения, что требует калибровки непосредственно перед проведением ответственных экспериментов.

В связи с этим заманчиво подобную схему измерений реализовать при использовании современной фоторегистрирующей аппаратуры на основе приборов с зарядовой связью – ПЗС–матриц. Однако даже поверхностный анализ применения подобной технологии указывает на ряд существенных проблем.

ПЗС–матрица – это многоэлементный твердотельный фотоприемник, каждый элемент которого состоит из двух областей – области накопления и области хранения заряда [11, 12]. Генерирование зарядов в фотоприемнике происходит не только под воздействием света, но и вследствие воздействия температуры, которая может повышаться под действием мощного фонового излучения источника нагрева (темновой ток в

полупроводниковых фотоприемниках экспоненциально зависит от температуры, поэтому при большом времени накопления заряда для его подавления требуется понижение температуры кристалла).

Во-вторых, при наличии ярких деталей изображения имеет место размытие (смаз), что не позволяет корректно оценить относительные яркости эталонного источника и нагретой поверхности (уровень смаза прямо пропорционален освещенности и площади яркой детали изображения, а также длительности переноса зарядов из секции накопления в секцию памяти и может превышать порог восприятия; эффект смаза может быть устранен только перекрытием светового потока на время переноса при помощи механического затвора).

В-третьих, так как работа ПЗС-матриц основана на накоплении и переносе зарядов, то при действии излучения источника нагрева, интенсивность которого многократно превышает интенсивность излучения нагретой поверхности (см. рис. 5), будет иметь место эффект «ослепления» фотоприемника, так как время переноса накопленного заряда, соответствующего действию излучения источника нагрева, в область хранения может превысить время накопления заряда от нагреваемого объекта в промежутке времени (рабочем кадре), соответствующем регистрации излучения от нагретой поверхности. Решению этих проблем может способствовать разработка электронных затворов с системой синхронизации регистрации изображения в моменты отсутствия излучения ГИИ.

Изложенный метод бесконтактного измерения температуры объекта, основанный на естественной модуляции газоразрядного источника излучения переменного тока, принципиально не применим при работе блока нагревателей. Это связано с относительным фазовым сдвигом питающего напряжения индивидуальных источников нагрева, а, следовательно, и отсутствием моментов времени, свободных от действующего излучения. В этом случае измерение температуры нагреваемого объекта может быть проведено на длинах волн, свободных от излучения источников нагрева. В частности в спектре излучения могут быть созданы искусственные полосы поглощения.

Наиболее просто этот принцип реализуется при использовании водоохлаждаемых ГИИ. Например, такая полоса в видимой области спектра может быть получена введением красителей в охлаждающую жидкость. Естественное требование при этом, чтобы полоса поглощения красителя находилась в области слабой полосы излучения плазмы газового разряда. Экспериментально установлено, что применительно к источникам с ксеноновым наполнением этому требованию удовлетворяет бриллиантовая зелень (спиртовой раствор тетраэтил-4,4-диаминотрифенилметана оксалата), объемная концентрация которой в охлаждающей жидкости (воде) $C = (0.2 \div 0.3) \times 10^{-2}$ обеспечивает необходимую ширину линии поглощения в окрестности рабочей длины волны оптических пирометров $\lambda = 0.63$ мкм (рис. 8).

Однако существенным недостатком этого метода является нестабильность красителей в поле мощного излучения, что требует периодической замены охлади-

теля в замкнутом контуре системы охлаждения и большого расхода красителя при проточной (незамкнутой) системе охлаждения.

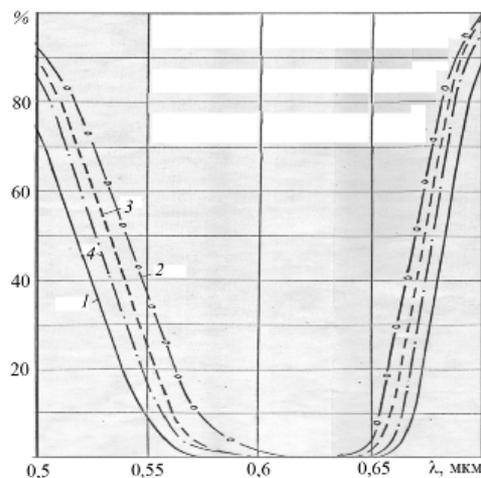


Рис.8. Пропускание слоя подкрашенной воды толщиной 10 (1, 4) и 5 мм (2, 3) при объемной концентрации красителя 0.001 (4); 0.002 (1, 2) и 0.003 (3)

Другой способ связан с нанесением покрытия, выполняющего роль фильтра-поглотителя излучения в спектральном диапазоне работы пирометра, на внутреннюю поверхность внешней оболочки водоохлаждаемого источника излучения или изготовления этой оболочки из стекла с присадками, обеспечивающими необходимую полосу поглощения в спектре излучения ГИИ. Применение этого способа сдерживается в основном техническими трудностями изготовления трубчатых фильтров, имеющих необходимые характеристики.

Определенные перспективы измерения температуры могут быть связаны с измерениями температуры на длинах волн, соответствующих естественным полосам поглощения хладагента в спектре излучения ГИИ, например в ближней ИК-области спектра на длинах волн: 1.5; 2; 2.5 мкм при использовании водяного охлаждения (рис. 9).

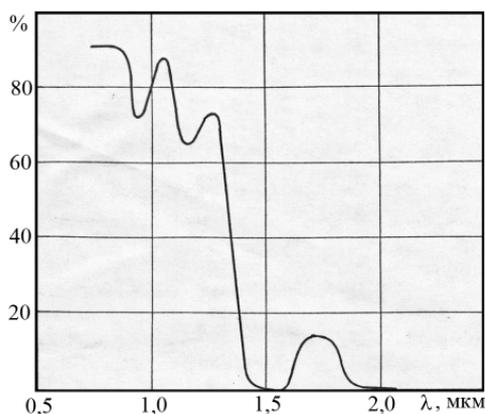


Рис.9. Спектр пропускания слоя воды толщиной 4 мм

При этом, однако, ограничиваются возможности визуализации картины процессов на нагреваемой поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача бесконтактного измерения температуры тел, нагреваемых широкополосными источниками излучения, перспективно, но сложно, потому что яркостные температуры мощных источников излучения, таких как газоразрядная лампа, существенно превышают яркостную температуру нагреваемого объекта

Разработка электронных затворов с системой синхронизации регистрации изображения в моменты отсутствия излучения ГИИ является одним из решения проблем.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- М – число Маха;
ГИИ – газоразрядный источник излучения;
ГЛА – гиперзвуковой летательный аппарат;
ГЛН – галогенные лампы накаливания;
АЧТ – абсолютно черное тело;
ЭОП – эталонный оптический пирометр.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Имитаторы космического пространства ООО “БЛМ Синержи” [Электронный ресурс]. URL: www.sales@blms.ru
2. Баранов А.Н., Белозеров Н.Г., Ильин Ю.С., Кутьинов В.В. Статические испытания на прочность сверхзвуковых самолетов. М.: Машиностроение, 1974. 344 с.
3. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Анализ технических возможностей создания высокоэффективных установок радиационного нагрева для тепловых испытаний объектов аэрокосмической техники // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2011. 1. С. 57–70.
4. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.
5. Линевег Ф. Измерение температур в технике. Справочник. М.: Металлургия, 1980. 544 с.
6. Скотников М.М. Применение фотопирометрического метода для определения температурных полей // Журнал прикладной спектроскопии. 1967. Т. 6. № 2. С. 153–157.
7. Экстон Р.Дж. Применение фотопирометра при исследованиях абляции теплозащитных материалов // Ракетная техника и космонавтика. 1969. Т. 7. № 12. С. 90–96.
8. Шишловский А.А. Прикладная физическая оптика. М.: Физматгиз, 1961. 822 с.
9. Дверняков В.С. Кинетика высокотемпературного разрушения материалов. Киев: Наукова думка, 1981. 152 с.
10. Елисеев В.Н., Товстоног В.А. Характеристики источников излучения и излучательных систем высокоинтенсивного нагрева // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2001. № 4. С. 3–32.
11. Никитин В.В., Цицулин А.К. Твердотельные фото-приемники. http://www.securitybridge.com/biblioteka/knigi_po_bezopasnosti/televidenie/pzsmatrycy/ Дата обращения 09.05.2013
12. Марин Милчев. Тенденции в цифровой фотографии. Ч. 3. ПЗС–матрицы. <http://www.3dnews.ru/editorial/photo-matrix/> Дата обращения 09.05.2013