



The system of measuring of the temperature fields distributing, constructed on the basis of digital camera-recorder, is considered. It is shown that the system has advantages as compared to traditional thermal-imaging sets on receivers, operating in medial and distant infra-red ranges.

И. В. ФАЙН, М. Л. ГЕРМАН, С. В. КОРНЕЕВ, А. Н. ОЗНОБИШИН,
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

УДК 53.082.5

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ТЕПЛОВИЗИОННАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОЙ ВИДЕОКАМЕРЫ С ЦЕЛЬЮ ПРИМЕНЕНИЯ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Введение. В металлургическом и машиностроительном производстве в технологических процессах, связанных с нагревом и охлаждением различных объектов до высоких температур (более 400 °С), часто возникает необходимость измерить не только температуру, но и ее распределение по поверхности. Во многих высокотемпературных промышленных процессах использование контактных методов измерения температур, например с помощью термопар, неприемлемо по производственным условиям. Альтернативой этим методам служат бесконтактные средства измерения высоких температур поверхности объектов, такие, как пирометры и тепловизоры (термографы) [1].

Оптическая пирометрия включает в себя комплекс методов, с помощью которых можно измерять температуру по тепловому излучению объекта в достаточно широком интервале. Спектральный диапазон измерений в целом определяется температурным диапазоном измерений: чем выше измеряемая температура, тем короче может быть характерная длина волны приемника излучения. Соответственно выбор детектора излучения определяется температурным диапазоном измерений. Для съемки объектов, имеющих температуру до 1000°С, максимум излучения приходится на средний инфракрасный (ИК) диапазон, поэтому большинство тепловизионных систем используют детекторы, чувствительные к этому диапазону излучения.

В настоящее время имеется ряд серийно выпускаемых тепловизионных систем, обладающих широкими возможностями и высокой точностью измерений. Недостатком традиционных тепловизоров широкого применения является их высокая стоимость, что ограничивает их использование в производственных условиях для анализа температурных полей и управления технологическими

процессами. Уменьшение стоимости системы измерения возможно за счет применения нетрадиционной для таких систем и относительно дешевой стандартной элементной базы цифровых видеосистем.

Тепловое излучение в интересующем нас диапазоне температур (400–1800 °С) значительно интенсивнее, и, следовательно, отношение сигнал/шум больше. С другой стороны, для съемки в ближней ИК области не требуется специализированных приемников, а достаточно использования значительно более распространенных и более дешевых ПЗС (прибор с зарядовой связью или CCD) матриц.

Хотя современные ПЗС матрицы имеют высокое отношение сигнал/шум (до 60 дБ и выше), этого недостаточно для измерений в широком диапазоне температур. Согласно оценкам, световой поток в ближней ИК области меняется на 3–4 порядка, так что необходимым условием работы прибора является возможность программного управления функциями видеокамеры и регистрирующей системы, такими, как усиление сигнала, управление экспозицией и т.д. В связи с этим большой интерес представляют цифровые видеокамеры, в которых функции управления видеокамерой и видеосигнала объединены в едином модуле, имеющем интерфейс с компьютером и позволяющем управлять всеми параметрами видеосъемки. Кроме того, цифровая камера не требует специального видеоввода, что позволяет использовать неспециализированный, в том числе и мобильный компьютер в качестве устройства обработки сигнала, записи или управления.

Имеется еще одно важное преимущество использования датчиков в ближнем ИК диапазоне по сравнению с традиционным для бесконтакт-

ных методов средним ИК диапазоном. Реальная точность измерений в значительной степени определяется оценкой излучательной способности объекта, которая не всегда может быть определена или измерена с необходимой погрешностью. Как будет показано ниже, чувствительность к неточностям оценки излучательной способности ϵ быстро падает с уменьшением длины волны приемника сигнала.

Видимый диапазон излучения менее эффективен для съемки из-за значительно более низкого уровня сигнала и наличия посторонних нетепловых источников света. Поэтому использование цветных видеокамер, фильтрующих ИК диапазон и имеющих значительно более низкую чувствительность к тепловому излучению, чем черно-белые видеокамеры, представляется нецелесообразным.

Таким образом, для технической реализации системы измерения температуры в интервале 600–1800 °С была выбрана цифровая промышленная черно-белая видеокамера.

Оборудование. Проведя поиск приемлемого варианта системы, было решено использовать цифровую видеокамеру, использующую промышленный стандарт ПДС. Этот протокол был принят в 1999 г. торговой ассоциацией 1394 (1394 Trade Association), которая включает в себя крупнейших производителей программного и аппаратного обеспечения (Sony, Toshiba, Intel, Microsoft и др.). В настоящее время большинство цифровых промышленных камер, имеющих интерфейс 1394, удовлетворяет единому протоколу обмена с компьютером ПДС 1.30. Наличие стандартного протокола управления контроллером камеры является

серьезным преимуществом системы, это, в частности, позволяет легко провести ее модернизацию.

Для построения системы измерений и проведения тестовых испытаний была выбрана цифровая видеокамера Fire-I производства Unibrain, удовлетворяющая упомянутым выше стандартам. Кроме того, при проведении экспериментов использовали оптический фильтр ИС-19, блокирующий излучение в видимой области для устранения помех.

Конструктивно камера Fire-i™ смонтирована на плате, где расположены контроллер интерфейса 1394, контроллер обработки видеосигнала, ССD матрица с драйвером, гнездо для крепления объектива и разъемы цифрового интерфейса и питания. Общий вид камеры приведен на рис. 1, а технические характеристики – в таблице.

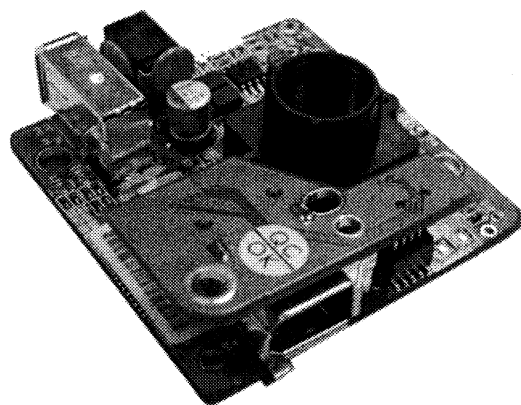


Рис. 1. Бескорпусная черно-белая цифровая камера с повышенной чувствительностью в ближнем ИК диапазоне Fire-i™ фирмы Unibrain

Технические характеристики тепловизионной системы

Параметр	Значение		
Диапазон измеряемых температур, °С	400–950	500–1300	600–1800
Температурное разрешение при температуре 1300 °С	Менее 1°С		
Инструментальная погрешность	Не более 1,5% от показаний		
Пространственное разрешение	640×480 точек		
Частота кадров	До 30 в секунду		
Скорость вывода термограмм	До 10 в секунду		
Рабочая температура, °С	–10 – 50		

Всего имеются пять параметров, загружаемых в контроллер, которые влияют на формирование конечного цифрового сигнала; роль каждого из них специфична. Экспозиция τ в условных единицах преобразуется по определенному правилу в значение реальной выдержки в микросекундах и используется в синхронизирующем сигнале, посылаемом контроллером через драйвер на вход ССD матрицы. Усиление g преобразуется в линейный коэффициент усиления, используемый мо-

дулем АЦП для формирования цифрового сигнала n . Яркость или уровень черного (Black level) устанавливает смещение сигнала относительно нуля. Это смещение зависит от ряда параметров, поэтому в системе предусмотрена автоматическая калибровка нуля, которая может быть отключена установкой атрибута яркости. Последние два параметра, гамма-коррекция γ и четкость S относятся к цифровой обработке сигнала и выполняются видеоконтроллером непосредственно после полу-

чения цифрового сигнала от АЦП. Четкость, или выделение границ объектов, является более сложной обработкой сигнала, она не может быть представлена простой формулой. В данной работе этот параметр был установлен в нуль, чтобы исключить искажение сигнала.

Аналоговый сигнал, принимаемый элементом ПЗС матрицы, интегрируется со спектральной характеристикой матрицы. Вообще говоря, излучательная способность многих тел зависит от длины волны, а также и от температуры. Однако фактически камера регистрирует тепловое излучение в весьма узком диапазоне ближнего инфракрасного света, поэтому эту величину можно считать постоянной, т.е. использовать модель серого тела.

Максимум характеристики ПЗС матриц приходится на диапазон видимого света, в инфракрасном диапазоне чувствительность матрицы уменьшается с увеличением длины волны и падает практически до нуля при длине волны $\lambda \sim 1$ мкм. Эта характеристика практически одинакова для любых ПЗС матриц, выпускаемых фирмой SONY, поэтому представляется возможным распространить полученные в исследованиях результаты и на другие варианты построения систем на основе ПЗС матриц. Эффективная длина волны приемника незначительно меняется с изменением температуры излучаемого тела, с достаточной степенью точности ее можно считать постоянной.

Узкополосная регистрация теплового сигнала ПЗС матрицей позволяет использовать оптические фильтры для снижения уровня посторонних шумов и уменьшения тепловой нагрузки на датчик. Так, использование фильтра, блокирующего видимый свет, практически не сказывается на чувствительности камеры к тепловому излучению. Эффективным представляется также использование фильтров, блокирующих излучение с длиной волны более 1 мкм, что позволит уменьшить перегрев матрицы.

Точность измерений. Хотя многие приборы бесконтактного измерения температуры имеют высокую точность измерений (обычно 1,0–1,5% от измеряемой величины), реальная погрешность измерений может быть значительно выше вследствие различных факторов, основными из которых являются:

1. Наличие рядом с измеряемым объектом более нагретых тел. Этот фактор существенно искажает измерения за счет отражения поверхностью измеряемого объекта излучения от соседних тел. Ошибка измерений может достигать десятков процентов; она не устраняется даже при использовании более сложных приборов, основанных на методе спектрального отношения.

2. Ослабление сигнала при распространении от объекта съемки к прибору. Эти потери зависят от расстояния до измеряемого объекта, степени про-

зрачности атмосферы, спектрального диапазона и не всегда могут быть учтены в полной мере.

3. Ошибки, связанные с неточностью определения излучательной способности объекта. Эти ошибки в значительной мере устраняются использованием методов спектрального отношения. Для большинства тепловизоров чаще всего используют более простые, однолучевые методы регистрации сигнала, так что указанная проблема может быть весьма актуальной. Рассмотрим более подробно эту зависимость.

Чувствительность к неточностям оценки излучательной способности ϵ можно определить, интегрируя выражение для излучения черного тела (формула Планка) со спектральной характеристикой чувствительности датчика по всему диапазону частот и затем сравнивая результаты при изменении ϵ и T . Для узкополосного приемника величина сигнала прямо пропорциональна величине ϵ и практически экспоненциально падает с увеличением обратной абсолютной температуры. При этом показатель экспоненты пропорционален частоте сигнала, т.е. для более коротких волн он выше. Поэтому следует ожидать, что ошибка в определении температуры будет увеличиваться с уменьшением частоты приемника сигнала и с ростом температуры. Так, в диапазоне 0,8–1,0 мкм чувствительность температурных измерений к погрешностям в ϵ в 8 раз ниже, чем в диапазоне 12–14 мкм для температуры измерения 1000°C. На рис. 2 показана зависимость абсолютной погрешности измерения температуры от величины температуры при различных эффективных длинах волны приемников. Из рисунка видно, что измерение с приемниками, работающими на коротких волнах в ближнем инфракрасном диапазоне, эффективнее.

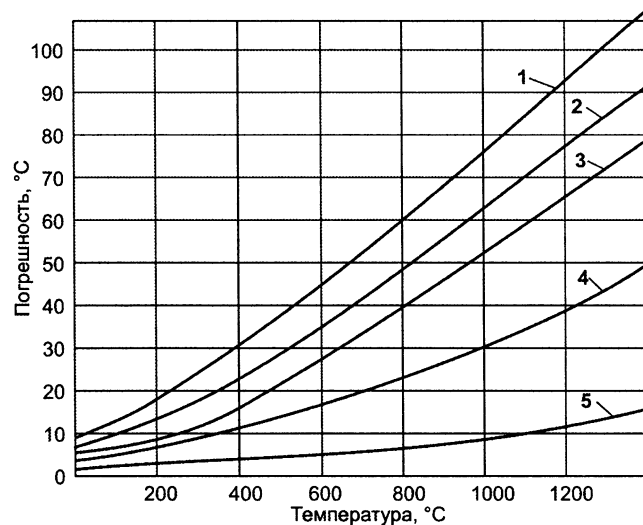


Рис. 2. Зависимость погрешности измерения температуры от эффективной длины приемника излучения (ошибка в задании коэффициента излучательной способности равна 12%):
1 — $\lambda=12$ мкм; 2 — 8; 3 — 6; 4 — 3; 5 — 0,9 мкм

Для оценки реальной точности разработанной системы были проведены эксперименты по измерению температур и записи информации о температурах в различных точках объектов синхронно от тепловизионной системы, пирометра и термомпар, зачеченных на поверхности остывающих объектов. При этом было получено множество данных, которые в дальнейшем были обработаны и проанализированы. Чувствительность камеры оказалась достаточной для измерения температур объектов, начиная с 450 °С. Этот порог чувствительности может быть еще уменьшен за счет увеличения коэффициента усиления и поднятия уровня яркости (смещения нуля). Конечно, с уменьшением уровня сигнала для качественной оценки температуры объектов большое значение имеет отсутствие посторонних шумов и прежде всего других источников света. Теоретически при условиях затемненного помещения камера позволяет регистрировать тепловое излучение, начиная с 400 °С и даже ниже.

Съемку видеокamerой проводили при различных значениях коэффициента усиления и экспозиции. Учитывая высокое быстродействие системы (до 30 кадров/с) и сравнительно низкое быстродействие пирометра (менее 1 изм/с), за один цикл измерений осуществляли многократную съемку объекта при различных параметрах. В результате были получены ряд калибровочных кривых, анализ которых показал, что система обладает высокой повторяемостью результатов измерений, кривые носят регулярный и монотонный характер. При этом оказалось, что логарифм аналогового сигнала пропорционален логарифму экспозиции и коэффициенту усиления, а также значению цифрового выхода, деленного на функцию от смещения. Если калибровочные данные построить в осях логарифм аналогового сигнала – обратная температура, они образуют единую прямую, наклон которой соответствует узкополосному приемнику с длиной волны 0,9 мкм (рис. 3). Таким образом, в довольно широком температурном интервале измеряемая температура может быть рассчитана по единому калибровочному соотношению.

Точность получаемых данных была оценена по регрессионной зависимости. Среднеквадратичная ошибка отклонения предсказанной температуры от показаний пирометра составила 2,4 °С при коэффициенте корреляции 0,994 и коэффициенте регрессии 1,001. Эти результаты говорят о том, что данная зависимость может быть уверенно использована во всем диапазоне 450–800 °С, где проводилась калибровка.

Применение. Разработанная система тепловизионных измерений в области температур от 400 до 1800 °С может иметь три основные области применения: визуализация температур, измерение и управление.

При визуальном контроле система позволяет отображать неравномерности распределения температурных полей с высоким температурным

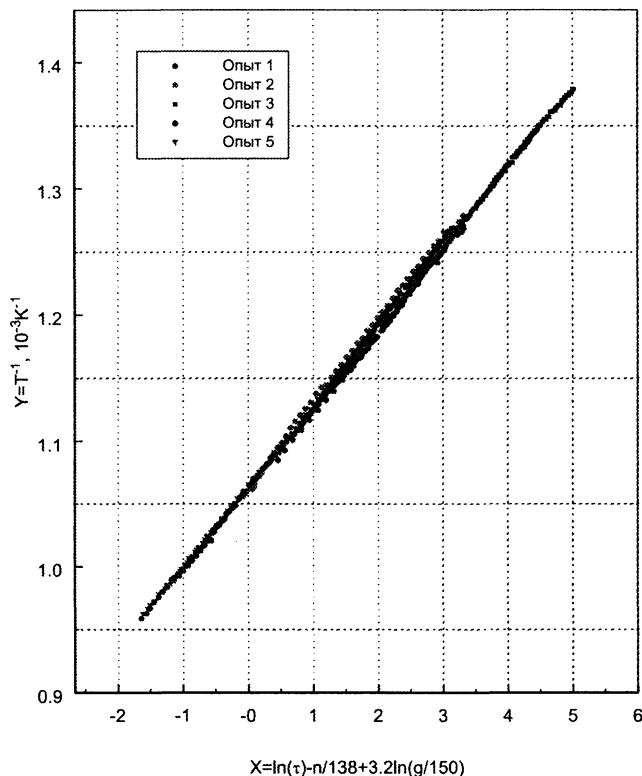


Рис. 3. Универсальная зависимость для всех диапазонов измерения системы, полученная опытным путем

(менее 1 °С при 1300 °С) и пространственным разрешением (640x480 точек). Кроме визуализации, возможно измерение температуры в различных точках с инструментальной погрешностью не более 1,5% от показаний, а также определение температурных контрастов. На рис. 4, а представлено изображение в видимом свете балки передней оси автомобиля МАЗ после процессаковки, а на рис. 4, б – термограмма, полученная при использовании тепловизионной системы, показывающая распределение температуры по поверхности балки.

Система также позволяет производить измерения температурных полей с высокой скоростью в динамике, т. е. при охлаждении или нагреве объектов. При этом возможно определение тепловых свойств материалов, кроме того, и параметров процесса нагрева или охлаждения, таких, как коэффициенты конвективного, лучистого и суммарного теплообмена, так как при измерениях получается большой объем данных об изменении температуры поверхности за малое время. На рис. 5, а показана термограмма стального диска, охлаждаемого на воздухе по истечении 250 с от начала съемки после выдачи из печи, а на рис. 5, б – зависимость температуры в различных точках поверхности объекта от времени охлаждения. Из рис. 5, б можно определить диапазон температур, в котором происходит изменение структуры материала, из которого изготовлен диск, т.е. температуры начала и конца фазового перехода, которые в общем случае зависят от скорости охлаждения.

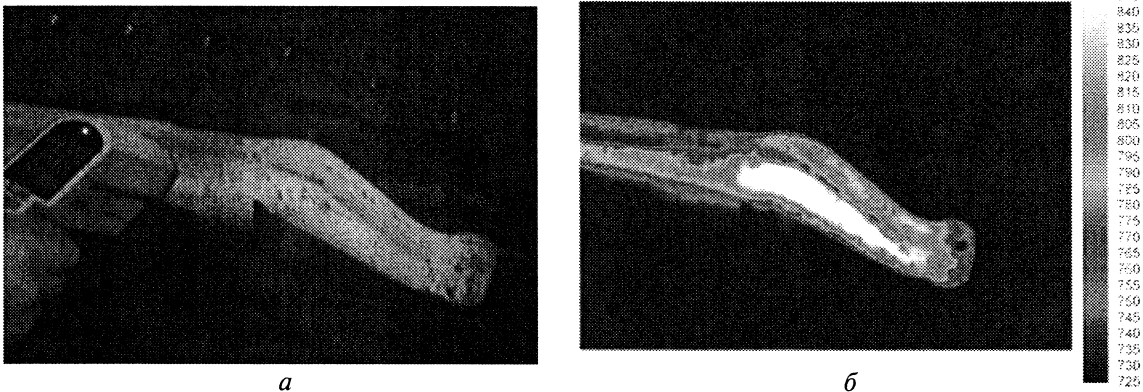


Рис. 4. Изображение балки в видимом свете после процесса ковки (а) и ее термограмма (б)

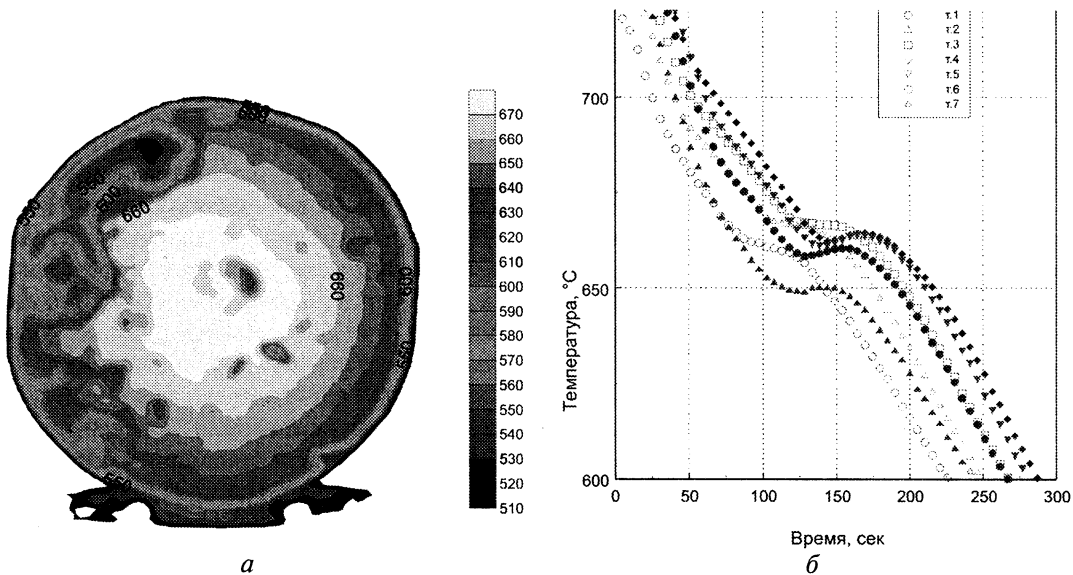


Рис. 5. Термограмма диска (а), охлаждаемого на воздухе, и кривые температур в различных точках объекта, расположенных по диаметру диска (б)

В связи с тем что данные с камеры поступают в цифровой форме и с высокой скоростью, то систему тепловизионных измерений можно эффективно использовать в составе систем автоматического управления различными печными агрегатами, например для коррекции температурного поля печи [2], а также для контроля температур поверхности и коррекции режимов при управляемой термообработке.

В таблице приведены технические характеристики разработанной тепловизионной системы, обеспечивающие эффективность применения для указанных областей.

Выводы. Показано, что система измерения высокотемпературных полей на основе промышленной черно-белой видеокамеры является весьма эффективной. Она обладает простой универсальной калибровочной зависимостью и способна проводить измерения в широком диапазоне температур. Поскольку универсальная зависимость определяется только спектральной характеристикой ПЗС структуры, результаты работы могут быть распространены на все системы, построенные на ПЗС матрицах подобного типа. Многие

другие параметры систем такие, как температурное разрешение, чувствительность к неточностям определения излучательной способности, также являются универсальными. Фактически экспериментальная калибровка камеры в значительной степени заключается только в нахождении некоторой одной постоянной, зависящей от чувствительности матрицы и характеристик оптического канала камеры; остальные параметры можно определить теоретически.

Таким образом, разработанная система характеризуется низкой стоимостью, высоким температурным и пространственным разрешением, а также высокой точностью измерений, высокой скоростью съемки, низкой чувствительностью к изменению степени черноты объекта, компактностью оборудования, возможностью встраивания в имеющиеся системы автоматизированного управления.

Литература

1. Тарасов В.В., Якушенко Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. М., 2004.
2. Rue D.M., Zelopouga S. Thermal Imaging Control of Furnaces and Combustors // Final Technical Report of Gas Technology Institute, Project N. 61118, February 2003.