



ОБ ОДНОЙ МАЛОИЗВЕСТНОЙ ОСОБЕННОСТИ ПИРОМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ

Фрунзе А.В., к.т.н., ННТП "ТЕРМОКОНТ", Москва

Пирометры спектрального отношения в последние годы становятся все более привлекательными для потребителей. Прогресс в области элементной базы в несколько раз снизил их стоимость (теперь она в среднем лишь в полтора раза превышает стоимость традиционных энергетических пирометров с теми же метрологическими характеристиками). Современные пирометры спектрального отношения свободны от большинства недостатков, присущих энергетическим пирометрам: во-первых, в них не нужно вводить значение коэффициента излучения; во-вторых, они позволяют измерять температуру малоразмерных объектов, меньших поля зрения пирометра на выбранном расстоянии, в-третьих, позволяют производить измерения через стекла практически без потери точности. Далее, у них отсутствует зависимость результатов измерений от расстояния до объекта измерения. Но так ли они идеальны?

Увы, идеальных пирометров нет. И у пирометров спектрального отношения есть один очень серьезный недостаток. Он был выявлен около полувека назад. Однако устранить его наука долгое время была не в состоянии. По этой причине в научных журналах и в технической литературе в последние лет тридцать эта тема не затрагивалась – что говорить об этом, если проблема давно описана, а ее решения пока нет? Поэтому многие пользователи даже и не догадываются о существующей проблеме.

"ЧЕРНЫЕ", "СЕРЫЕ" И "НЕСЕРЫЕ" ТЕЛА

Прежде чем приступить к обсуждению самой проблемы, необходимо коснуться терминологии. В термодинамике введено понятие "абсолютно черное тело" (АЧТ), которое характеризуется тем, что оно абсолютно непрозрачно для излучения с любой длиной волны, и абсолютно ничего не отражает. То есть, все попавшее на него излучение оно поглощает. Для такого идеализированного объекта возможно точно описать свойства его излучения. Но реальные объекты при излучении заметно отличаются от АЧТ.

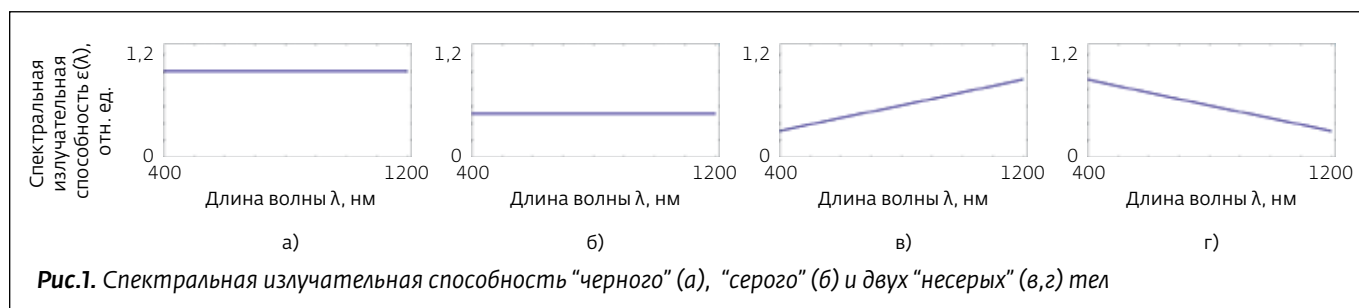
Пирометры, определяющие температуру по излучению объектов, нужно калибровать на каких-то эталонных средствах. Для исключения различий в калибровке принято калибровать их на МЧТ – "модели черного тела", или "макете черного тела". МЧТ является реальным объектом, излучательные, отражательные и поглощательные

характеристики которого близки к идеальным характеристикам АЧТ.

Излучательная способность АЧТ выбрана равной единице для любой длины волны теплового излучения. У хороших МЧТ излучательная способность на любой длине волны лежит в пределах 0,99–0,999. МЧТ и АЧТ мы далее будем называть "черными телами". Спектральная излучательная способность "черного тела" приведена на рис. 1а.

Существуют объекты, которые излучают точно так же, как и "черное тело", но интенсивность их излучения на любой длине волны меньше, чем у "черного тела", в одно и то же число раз. На рис. 1б изображена спектральная излучательная способность одного из таких объектов, на любой длине волны она меньше, чем у "черного тела", ровно вдвое. То есть излучательная способность этого объекта на любой длине волны равна 0,5 (реально она может быть любой в пределах 0,02–0,98). График зависимости спектральной излучательной способности такого объекта от длины волны – прямая линия, параллельная оси ОХ. Объекты с такой спектральной излучательной способностью называют "серыми телами".

Помимо "черных" и "серых" тел существуют также и "несерые тела". Это объекты, спектральная излучательная способность которых изменяется с изменением длины волны – растет или падает (рис. 1в и 1г). Возможен рост спектральной излучательной способности в одной части спектрального диапазона, и спад – в другой, как на рис. 2.



Как представляется, "несерых тел" очень много, в природе и в технике они встречаются гораздо чаще, чем "серые тела". Очень много примеров "несерых тел", которыми являются большинство металлов, огнеупоров и т.д., описаны в работах в [1,2]. И именно при измерении температуры "несерых тел" в пирометрах спектрального отношения возникает проблема, которой посвящена настоящая статья.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ

Далее нам понадобятся определения основных видов погрешностей, присущих средствам измерения (в том числе и пирометрам). Мы рассмотрим инструментальные и методические погрешности.

Инструментальные погрешности являются следствием недостатков, присущих самим средствам измерений. Они могут быть уменьшены или исключены при усовершенствовании самих средств измерений – термостабилизацией критичных к температуре узлов, экранировкой, установкой более чувствительных датчиков, более точной калибровкой и т.д.

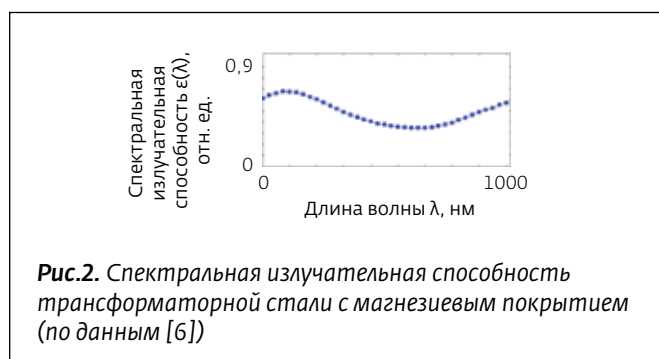
В отличие от инструментальных, методические погрешности – это те погрешности, которые присущи данному методу измерений. Они возникают вне зависимости от того, насколько хорошо калиброваны средства измерений. Методические погрешности нельзя исключить простым

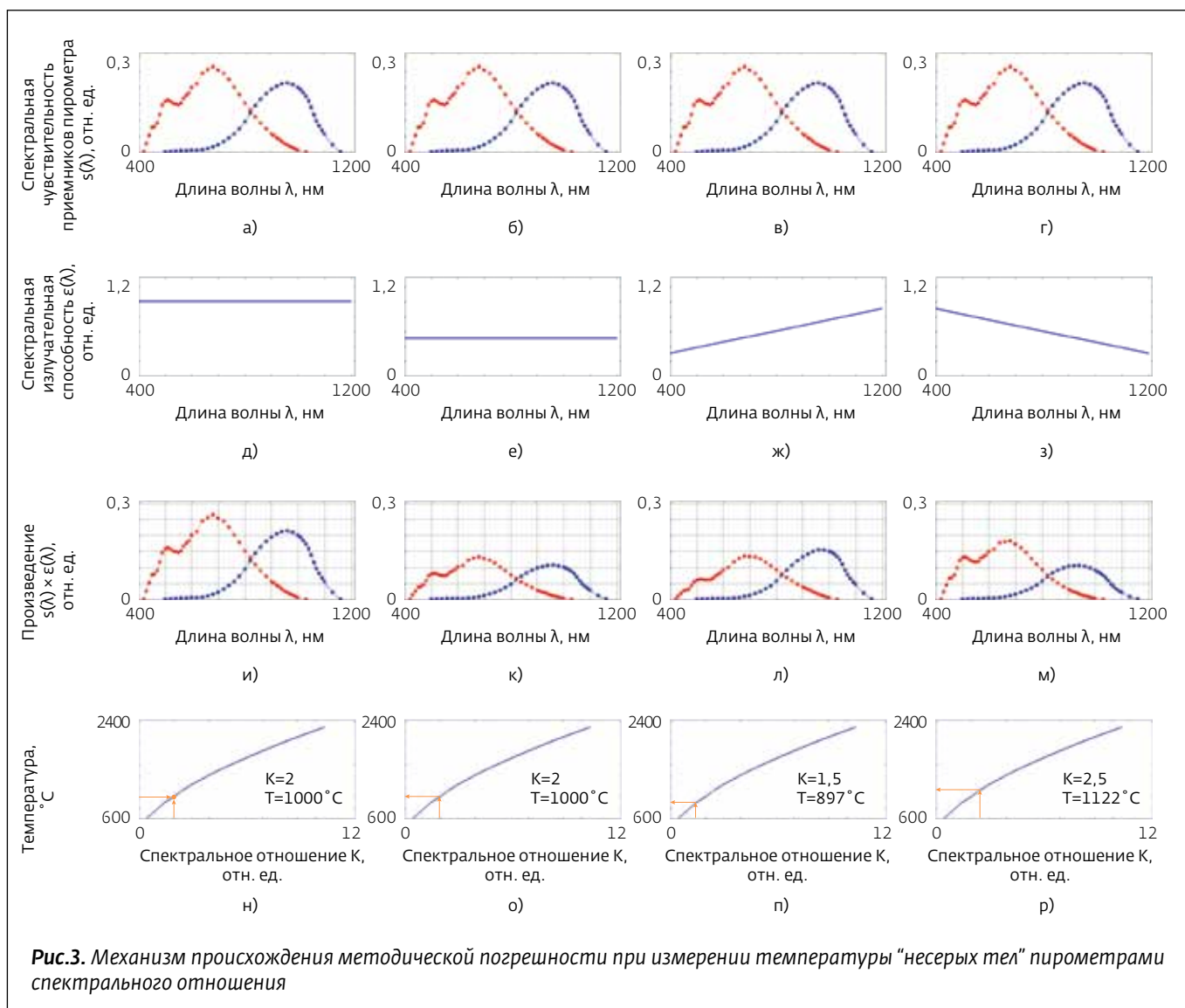
улучшением метрологических характеристик измерительных приборов, без изменений методики измерений.

Приведем пример типичных инструментальной и методической погрешностей, возникающих в пирометрии. Наиболее серьезной инструментальной погрешностью пирометра является зависимость результатов измерений от температуры окружающей среды. Например, для пирометров, выполненных на основе фотодиодов, изменение температуры окружающей среды на 10°C приводит к появлению дополнительной погрешности величиной порядка 1% от результата измерений. Изменение температуры окружающей среды на 20°C приведет к появлению 2%-ной погрешности, и т.д. Но это все справедливо для пирометров, у которых узел приемника не термостатирован. Если же узел приемника (вместе со светофильтром) термостатировать, указанная дополнительная погрешность исчезнет, и результат измерений практически перестанет зависеть от окружающей температуры. Иными словами, усовершенствование средства измерений (термостатирование приемного узла) практически исключило описываемую погрешность – то есть эта погрешность, если так можно высказаться, целиком на совести самого пирометра и его производителя.

Рассмотрим теперь типичную методическую погрешность, проявляющуюся в пирометрии. Положим, объект измерения находится внутри печи, и нагрев его производится сгорающим внутри печи газом. Объект нагрет до температуры T_1 , температура стенок печи равна T_2 , и за счет теплоотвода в окружающую среду она несколько ниже, чем T_1 .

На приемник пирометра при измерении температуры объекта попадает поток излучения, имеющий две составляющие. Это, во-первых, собственное излучение измеряемого объекта, а во-вторых, отраженное объектом собственное излучение стенок печи. Если бы у нас вторая составляющая отсутствовала, то, зная излучательную способность объекта и имея хорошо калиброванный пирометр,





мы смогли бы определить температуру этого объекта с высокой точностью, определяемой исключительно погрешностью пирометра. Однако вторая составляющая постоянно присутствует, и пирометр преобразует суммарный поток энергии в значение температуры, более высокое, чем реальная температура измеряемого объекта. А поскольку эта переотраженная компонента потока энергии от стен печи присутствует всегда, то это приводит к завышению результата измерения любым пирометром, как бы хорошо он ни был откалиброван. То есть, описанная дополнительная погрешность, если вернуться к категориям прав/виноват, лежит на совести метода измерений, пирометр к ней может быть и вовсе непричастен.

Далее следует сделать еще одно замечание. Пирометрия относится к области измерений, где количество различных методических

погрешностей очень велико, чуть ли не больше, чем в любой иной области измерений. Например, при измерении напряжения вольтметром можно выделить только одну методическую погрешность - обусловленную контактной разностью потенциалов с соответствующей температурной зависимостью. В энергетической пирометрии, согласно [3], методических погрешностей насчитывается десять! Прибавьте к этому еще четыре-пять серьезных инструментальных погрешностей, обычно присутствующих в типичных пирометрах, и вы поймете, как тяжело обеспечить высокую точность измерений при помощи пирометра.

ПЛЮСЫ И МИНУСЫ ПИРОМЕТРОВ СПЕКТРАЛЬНОГО ОТНОШЕНИЯ

Говоря о пирометрах спектрального отношения, нужно учитывать следующее. Упомянутые выше

десять методических погрешностей, присущие энергетическим пирометрам, в пирометрах спектрального отношения отсутствуют. И это выгодно отличает пирометры спектрального отношения от энергетических измерителей температуры.

Но, как уже было сказано, идеальных средств измерений не бывает. Одна методическая погрешность у пирометров спектрального отношения все же есть. Она возникает при измерении температуры "несерых тел".

Если "несерое тело" имеет спектральную излучательную способность, возрастающую с ростом длины волны излучения (см. рис. 1в), то результаты измерения температуры такого объекта пирометром спектрального отношения будут занижены. Величина занижения зависит от крутизны спада характеристики.

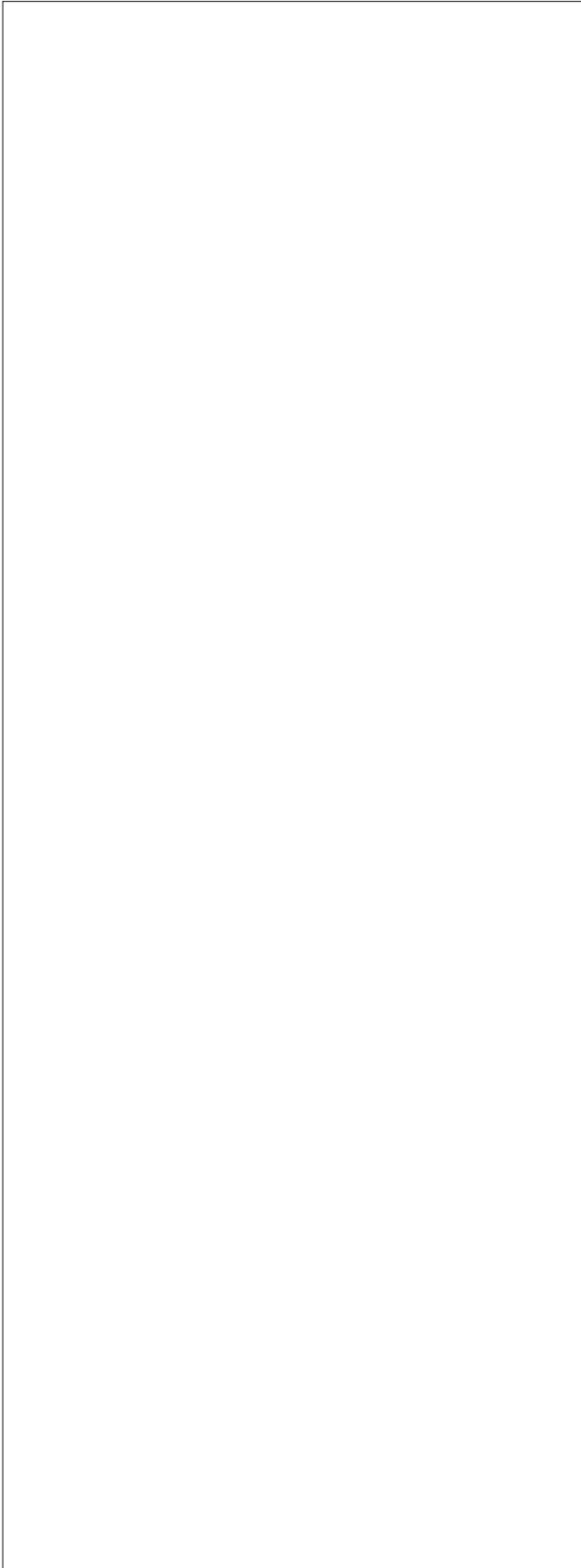
Если "несерое тело" имеет спектральную излучательную способность, уменьшающуюся с ростом длины волны излучения (см. рис. 1г), то результаты измерения температуры такого объекта пирометром спектрального отношения будут завышены. Величина завышения также зависит от крутизны подъема характеристики.

О наличии у пирометров спектрального отношения такой погрешности, как уже говорилось, известно давно. В работе [4] приведено соотношение для "несерого тела", связывающее его действительную температуру с результатом измерения температуры пирометром спектрального отношения и с параметрами изменения спектральной излучательной способности. Однако это соотношение справедливо только для пирометров спектрального отношения с узкими (δ -образными) полосами спектральной чувствительности приемников пирометра. Для широкополосных приемников это соотношение неприменимо. А другого аналитического соотношения вывести так и не удалось. Именно поэтому упомянутая погрешность пропала из поля зрения научной литературы по пирометрии, а затем и из большинства книг и учебников по пирометрии. Но сама погрешность, естественно, никуда не делась, даже если мы о ней и не догадываемся.

ПРИЧИНА ВОЗНИКНОВЕНИЯ РАССМАТРИВАЕМОЙ ПОГРЕШНОСТИ

Рассмотрим причину возникновения методической погрешности в пирометре спектрального отношения, измеряющего температуру "несерого тела".

На рис. 3 во втором ряду сверху приведены (слева направо) спектральные излучательные





способности "черного тела", "серого тела" и двух "несерых тел". Для определенности назовем "серое тело" с возрастающей с ростом длины волны излучающей способностью "серым телом №1", а "серое тело" с уменьшающейся с ростом длины волны излучающей способностью "серым телом №2" (названия произвольные, не устоявшиеся). Пусть температура каждого из этих тел равна 1000°C .

Также предположим, что каждое из этих тел мы будем измерять пирометром спектрального отношения, спектральные характеристики чувствительности приемников которого приведены на рисунках верхнего ряда.

Для каждого из рисунков третьего ряда площадь под красной кривой пропорциональна сигналу, вырабатываемому коротковолновым приемником пирометра, а площадь под синей кривой – сигналу, вырабатываемому длинноволновым приемником. Это происходит потому, что сигнал с выхода приемника пропорционален интегралу от функционального произведения спектральной излучательной способности данного объекта на спектральную чувствительность соответствующего приемника, а интеграл – это площадь под полученной кривой. То есть, для каждого из рассматриваемых тел мы для длин волн 500, 600, 700 нм и т.д. берем значение спектральной излучательной способности (со второго сверху рисунка соответствующего столбца на рис.3) и умножаем на значение чувствительности на этой же длине волны коротковолнового приемника (синяя кривая верхнего рисунка соответствующего столбца). Получив, таким образом, точку синей кривой рисунка (см. рис.3, третий сверху) этого столбца. Затем так же получаем и точки красной кривой.

Для "черного тела" (левый рисунок третьего ряда на рис.3) площадь под красной кривой примерно вдвое больше площади под синей кривой. Назовем спектральным отношением K отношение площади под красной кривой к площади под синей кривой. Для нашего "черного тела", как только что было отмечено, $K=2$. Это спектральное отношение соответствует температуре "черного тела", равной 1000°C . Поскольку градуировка пирометра производится именно на "черном теле", эти два значения ($K=2$ и $T=1000^{\circ}\text{C}$) задают одну из точек градуировочной кривой пирометра (нижний рисунок левого ряда). Аналогично получают и остальные точки градуировочной кривой.

Теперь обратимся к "серому телу" (рисунки второго слева столбца). Площадь под красной кривой (третий сверху рисунок) ровно вдвое меньше площади под красной кривой для аналогичного рисунка для "черного тела". То же можно сказать и о площадях под синими кривыми. Это – следствие того, что кривые третьего сверху рисунка для "серого тела" представляют собой сжатые по вертикали ровно вдвое кривые третьего сверху рисунка для "черного тела", так как в выбранном примере спектральная излучательная способность "серого тела" равна 0,5 на любой длине волны. Поэтому спектральное отношение при измерении нашим пирометром нашего "серого тела", как нетрудно сообразить, также будет равно двум. А на градуировочной кривой $K=2$ будет соответствовать температуре $T=1000^{\circ}\text{C}$. То есть температуру "серого тела" пирометр спектрального отношения определит точно, без каких-либо методических погрешностей. И без знания излучательной способности измеряемого объекта.

Последнее и считается главным преимуществом пирометров спектрального отношения – для получения результата измерения вам не надо вводить в него значение коэффициента излучения, ломать голову над тем, откуда взять это значение. Но напомним – это все справедливо только при измерении температуры "черных" и "серых тел". При измерении температуры "несерых тел", как мы сейчас убедимся, все не так уж радужно.

Рассмотрим рисунки третьего слева столбца ("серое тело" №1). Спектральная излучательная способность его с ростом длины волны возрастает (второй сверху рисунок). Если эту зависимость функционально умножить на спектральные чувствительности приемников пирометра (синяя и красная кривые верхнего рисунка), то получим кривые третьего сверху рисунка. Здесь площадь под красной кривой, как уже говорилось, пропорциональна выходному сигналу коротковолнового приемника, а площадь под синей кривой – сигналу длинноволнового приемника.

Малые значения спектральной излучательной способности в коротковолновой области (400–700 нм) заметно сжали по вертикали красную кривую. В то же время в области максимума синей кривой значения спектральной излучательной способности в нашем примере достаточно велики (от 0,75 до 0,9). Поэтому сжатие по вертикали синей кривой, хоть и имеет





место, но незначительно в сравнении с красной. Вследствие этого спектральное отношение K уменьшилось примерно до значения 1,5. А на градуировочной кривой $K=1,5$ соответствует температуре $T=897^{\circ}\text{C}$. То есть, температуру "несерого тела" №1 пирометр спектрального отношения определит с более чем 100-градусным занижением. Причиной этого является не что иное, как снижение интенсивности сигнала коротковолнового приемника, что трактуется пирометром как более низкая температура, чем в действительности.

Рассмотрим теперь рисунки крайнего правого столбца ("серое тело" №2). Спектральная излучательная способность его с ростом длины волны уменьшается (второй сверху рисунок). Если эту зависимость функционально умножить на спектральные чувствительности приемников пирометра (синяя и красная кривые верхнего рисунка), то получим кривые третьего сверху рисунка. Здесь опять площадь под красной кривой пропорциональна выходному сигналу коротковолнового приемника, а площадь под синей кривой – сигналу длинноволнового приемника.

Малые значения спектральной излучательной способности в длинноволновой области (800-1200 нм) заметно сжали по вертикали теперь уже синюю кривую. В то же время в области максимума красной кривой значения спектральной излучательной способности в нашем примере достаточно велики (от 0,7 до 0,8). Поэтому сжатие по вертикали красной кривой, хоть и имеет место, но незначительно в сравнении с синей. Вследствие этого спектральное отношение K возросло примерно до значения 2,5. А на градуировочной кривой $K=2,5$ соответствует температуре $T=1122^{\circ}\text{C}$. То есть температуру "несерого тела" №2 пирометр спектрального отношения определит с более чем 100-градусным завышением. Причиной этого является снижение за счет излучательных свойств объекта интенсивности сигнала длинноволнового приемника, что трактуется пирометром как более высокая температура, чем в действительности.

Итак, мы убедились, что температуру "черного" и "серого тела" пирометр спектрального отношения определит точно, без каких-либо методических погрешностей. Что касается температуры "несерых тел", то если их спектральная излучательная способность возрастает с ростом длины волны, у пирометра возникает

систематическая методическая погрешность в сторону занижения результата измерения. Если их спектральная излучательная способность уменьшается с ростом длины волны, у пирометра возникает систематическая методическая погрешность в сторону завышения результата измерения.

ЧТО ДЕЛАТЬ?

Итак, мы убедились в том, что в пирометрах спектрального отношения при измерении температуры "несерых тел" возникает систематическая методическая погрешность, которая может привести как к завышению результата измерения, так и к занижению. Причем к довольно существенному. Что же делать в этом случае?

Первая рекомендация, идущая чаще всего от руководителей, не владеющих информацией в области пирометрии и не имеющих сил и времени на то, чтобы разбираться в этом вопросе – купить дорогой импортный прибор и закрыть проблему – у импортных приборов этих погрешностей быть не должно. Увы, это не так. Описанная погрешность определяется не тем, кто сделал прибор, а физическими законами, одинаковыми на всех шести континентах. Возьмете ли вы импортный пирометр спектрального отношения от Raytek или от Mikron, либо это будут отечественные "Диэлтест" или "Термоконт", у всех у них при измерении температуры "несерых тел" НЕИЗБЕЖНО возникнет упомянутая методическая погрешность примерно одной и той же величины. Поэтому рекомендация "купить импортный прибор и забыть о проблеме" не работает, прибор купите, а проблема останется.

Ну, хорошо, скажете вы, так что же делать в таком случае? Все зависит от того, какую проблему вам надо решить.

Если прибор приобретается для контроля температуры в более-менее отлаженном технологическом процессе, делать ничего не надо. Приобретайте прибор, устанавливайте в выделенное для него место, запускайте и его, и ход контролируемого им процесса, и осуществляйте контроль с его помощью. Да, если ваш объект – "несерое тело", возникнет погрешность измерений. Но не зря я выше говорил, что она систематическая. То есть при измерении одних и тех же объектов этим пирометром величина этой погрешности будет неизменной. Иными словами, пусть пирометр сегодня показал при измерении 1010°C . Если он и завтра,



и послезавтра, и через полгода покажет, что температура болванки из этого же материала равна 1010°C , можете не сомневаться, что она и завтра, и послезавтра, и через полгода та же, что была сегодня. И если при 1010°C на пирометре ваш технологический процесс идет так, как вам это нужно, – корректируйте его ход по пирометру, поддерживайте режим так, чтобы температура по пирометру как можно меньше отличалась от 1010°C . А то, что реально температура, возможно, на $60\text{--}90^{\circ}\text{C}$ ниже или выше, чем показывает пирометр – это в данном случае неважно, вам нужна повторяемость, чтобы исключить брак.

Добавлю, что к тому же в пирометре спектрального отношения исключен "человеческий фактор" – в нем нет ручки установки коэффициента коррекции, которую оператор по той или иной причине может установить неверно. То есть, и с этой точки зрения пирометр спектрального отношения хорош – проблемы энергетических пирометров в нем отсутствуют, а его единственная врожденная проблема не мешает вам вести ваш технологический процесс с нужной вам повторяемостью.

Хуже, если вы ведете исследовательскую работу, где нужно знать температуру с заданной точностью. Или только-только запускаете техпроцесс, про который лишь из литературы известно, при какой температуре он должен идти. В этом случае вам нужно знать реальную температуру объекта, т.е. как-то корректировать показания пирометра (напомню, что речь идет об измерении температуры "несерых тел"). То есть, нужно найти поправки, используя которые, вы можете перейти от измеренной пирометром температуры объекта к его действительной температуре.

Здесь нужно понимать, что во-первых, это дополнительная работа. Согласно устоявшимся и утвержденным методикам, во всем мире пирометры калибруют по "черному телу", и эта калибровка в приборе должна остаться (иначе он не пройдет очередную поверку). То есть, вам нужно не заменить "неправильную" калибровку "правильной" (я встречался, увы, и с такой точкой зрения так называемых "специалистов"), а найти значения поправок при различных температурах именно для вашего "несерого" объекта. Ни Raytek, ни Mikron, ни "Диэлтест" или "Термоконт" не в состоянии самостоятельно заранее определить эти поправки для того ужасающего в количественном исчислении

ассортимента материалов, которые в технике приходится измерять (одних лишь марок стальных несколько тысяч!). А во-вторых, для этого нужно определенное оборудование, время и инженер. Как мне представляется, Raytek или Mikron такую работу для вас вести вряд ли будут, по крайней мере если вы заказываете у них всего один или два прибора. Иностранцы производители пошли по другому пути, о котором будет сказано ниже. Поэтому такую работу вам придется провести самостоятельно, получить результаты измерений в виде графика или таблицы, и корректировать результаты измерений, глядя в эту бумажку, что для XXI века несколько несолидно.

С отечественными производителями несколько проще, они могут (за оговоренные деньги) и работу эту провести, и занести результаты коррекции в прибор, чтобы вы считывали с дисплея пирометра уже скорректированные результаты, а не правили измеренное по бумажке с таблицей поправок. К тому же возможно, что ваш материал уже был исследован, и тогда вам лишь нужно заказать прибор, в котором есть коррекция на него. Такой прибор, конечно, будет дороже обычного прибора, но задачу измерения действительной температуры вашего "несерого объекта" он решит.

Особняком стоят появившиеся недавно пирометры спектрального отношения фирм Raytek, Mikron и Flir с ручкой регулирования отношения сигналов в каналах пирометра. Казалось бы, вращением этой ручки (или нажатием на соответствующие кнопки) вы можете внести коррекцию в пирометр, которая устранила методическую погрешность, возникающую при измерении температуры "несерых тел". Однако во-первых, информации о том, насколько и в какую сторону нужно вращать этот новый для пирометров спектрального отношения регулятор, ни у вас, ни у производителя нет. А во-вторых, как показано в [5], этот коэффициент имеет различные значения при разных температурах объекта. То есть, подобрав его при одном значении температуры и используя найденное значения впоследствии, вы не избавлены от погрешностей, причем тем больших, чем больше различаются измеряемая температура и та, при которой найдено положение ручки регулировки. То есть, опять неопределенная погрешность измерения.

Ну и к тому же, в таком приборе теряется наиболее привлекательное для пользователя



преимущество пирометра спектрального отношения – отсутствие органов коррекции. Если мы как-то худо-бедно понимаем, какие значения коэффициента коррекции нужно ставить в том или ином случае для энергетического пирометра, если типичные значения этих коэффициентов можно найти в справочной литературе, то с коррекцией при помощи ручки (или кнопок) пирометра спектрального отношения это не так, в литературе никаких данных по этим коэффициентам нет. То есть, уходя от имеющих органы регулировки энергетических пирометров, мы пришли к имеющим органы регулировки пирометрам спектрального отношения. И к отсутствию информации о коэффициентах коррекции для пирометров спектрального отношения. На мой взгляд, это не есть решение проблемы – пытаюсь решить одну, производители создали вторую, причем более сложную.

КРАТКИЕ ВЫВОДЫ

Подведем итоги. Традиционные пирометры спектрального отношения без органов коррекции лишены огромного количества методических погрешностей, присущих энергетическим пирометрам [3]. Они избавляют пользователя от головной боли, связанной с нахождением правильного значения коэффициента излучения, которое нужно вводить в энергетический пирометр. В традиционном пирометре спектрального отношения исключен "человеческий фактор" – в нем нет ручки установки коэффициента коррекции, которую оператор по той или иной причине может установить неверно. Он устойчивее при работе в атмосфере запыленности, при закрытии части площади измеряемого объекта теми или иными конструктивными элементами, которые невозможно убрать. Пирометры спектрального отношения лучше работают при измерениях через защитные сетки, через прозрачные окна, которые могут запыляться измеряемым объектом. Их результаты измерения не зависят от расстояния до объекта, они могут измерять температуру объектов гораздо меньших размеров, чем обычные энергетические пирометры.

Но у них есть один минус – систематическая методическая погрешность, возникающая при измерении температуры "несерых тел". Она может привести как к завышению результатов измерений, так и к занижению, в зависимости от вида спектральной излучательной способности измеряемого объекта. Если степень

"несерости" невелика, погрешность также будет невелика. Но при большой крутизне подъема или спада спектральной излучательной способности погрешность достигает значительных величин – до 10% и более. И все это справедливо для любых пирометров спектрального отношения, как отечественных, так и импортных.

Если прибор приобретается для контроля температуры в более-менее отлаженном технологическом процессе, то на эту методическую погрешность можно не обращать внимания. Ведь вам для исключения брака нужна лишь повторяемость процесса.

Если вам нужен пирометр для запуска технологического процесса или для исследовательской работы, то в этих случаях знание реальной температуры объекта действительно необходимо. То есть, нужно найти поправки, используя которые, можно перейти от измеренной пирометром температуры объекта к его действительной температуре. Обратившись к отечественным производителям, вы можете совместно с ними провести коррекцию приобретенного пирометра. К тому же возможно, что ваш материал уже был исследован [6], тогда вам нужно заказать прибор, в котором уже учтена таблица коррекции. Он решит задачу измерения действительной температуры вашего "несерого объекта".

ЛИТЕРАТУРА

1. Лисиенко В.Г., Шлеймович Е.М., Ладыгичев М.Г., Санников С.П., Щелоков Я.М. Температура: теория, практика, эксперимент: Справочное издание. 3 т. Т.1, кн.2. – М.: Теплотехник, 2009.
2. Излучательные свойства твердых материалов/Под ред. Шейндлина А.Е. – М.: Энергия, 1974.
3. Фрунзе А.В. Влияние методических погрешностей пирометра на выбор прибора. – Фотоника, 2012, № 3, с.46-51.
4. Линеверг Ф. Измерение температур в технике: Справочник/Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980.
5. Фрунзе А.В. Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения. – Фотоника, 2009, № 4, с.32-37.
6. Беленький А.М., Дубинский М.Ю., Ладыгичев М.Г., Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М. Измерение температуры: теория, практика, эксперимент: Справочное издание. 3 т. Т.2 – М.: Теплотехник, 2007.



