



# О ЧЕМ ПОЛЕЗНО ЗНАТЬ ПРИ ВЫБОРЕ ПИРОМЕТРА

А.Фрунзе, к.т.н., ННТП "ТЕРМОКОНТ"

В процессе измерения температуры реальных объектов все преимущества пирометра, даже с экстремально низкой погрешностью, из-за различных причин могут быть полностью утрачены, то есть погрешность составит не доли одного процента, как заявлено изготовителем, а даже 10 и более процентов. Поэтому при выборе пирометра надо ориентироваться не на минимальную погрешность, указанную в его паспорте, а на специфические особенности прибора, которые сделают его оптимальным для ваших задач и сведут неточности измерений к минимуму. И помните, что этот вопрос лучше обсуждать со специалистом. Он укажет на те проблемы, о которых менеджер по продажам умолчит.

**В** своей борьбе за потребителя производители стремятся совершенствовать параметры своих изделий. А точность (правильнее говорить о погрешности измерений) наряду с диапазоном измеряемых температур – это основные параметры пирометра. И естественно, заявляя более низкую погрешность, чем у конкурирующего изделия, производитель открыто говорит потребителю о том, что его продукт лучше, чем аналог от его конкурента.

В нулевом приближении это так. Но пирометрия – особая отрасль измерений, где не все столь просто, и где очень легко совершить неверный выбор из-за незнания особенностей, присущих этому виду измерений.

## ОСНОВНАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ПИРОМЕТРА – ЧТО ЭТО?

Начнем с того, что заявляемые производителями погрешности измерений – это те погрешности, которые присущи их изделиям при поверках и калибровках на идеальных излучателях, так называемых "черных телах" (МЧТ – модель или макет "черного тела"). Такие "черные тела" – обязательное оборудование любой поверочной лаборатории. Главная особенность этих излучателей в том, что их коэффициент излучения (иначе – излучательная способность) на любой длине волны практически равен единице (типовые значения: 0,990–0,998). И вот при измерении температуры именно

этих излучателей, в лабораторных условиях, при температуре окружающей среды 20–25°C, пирометры и демонстрируют свои точностные характеристики, которые называют основной погрешностью измерений данного прибора.

Итак, поставщики предложили вам два пирометра – один с основной погрешностью 0,25%, другой – с погрешностью 1%. С финансовой стороны вам по карману любой. Что выбрать? Памятуя, что скупой платит дважды, вы, скорее всего, выберете первый – ведь его погрешность ниже, значит, он лучше. Но, как я уже сказал, пирометрия – особая отрасль измерений, где все не столь просто.

## ВЛИЯНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ

Начнем с того, что на результат измерения пирометром в очень большой степени влияет излучательная способность измеряемого объекта. Напомним, что это такое. Представьте следующую картину: в нашем распоряжении есть алюминиевый чайник, стенки которого полированы, но на одном боку – большое пятно сажи (чайник как-то упал в костер, извлечен оттуда был не сразу, а оттирать въевшуюся сажу не хочется, на скорость закипания она не влияет). Так вот, если вы наведете пирометр на закопченную поверхность кипящего чайника, то пирометр покажет 90–95°C. При наведении на чистую полированную поверхность пирометр выдаст результат порядка 30–35°C. И заметьте,



Зависимость погрешности измерения от длины волны и температуры (ошибка ввода коэффициента излучения 10%)

Температура, К	Длина волны излучения, мкм						
	0,6	1	1,5	2	5	8	12
Качество луча, М2	0,0063	0,0105	0,0157	0,0208	0,0504	0,0782	0,1129
Длительность импульса, нс	0,0079	0,0131	0,0195	0,0258	0,0622	0,0959	0,1372
Охлаждение	0,0102	0,0169	0,0252	0,0333	0,0793	0,1212	0,1714

чайник-то при этом кипит, то есть вода внутри него имеет температуру около 100°C, и к стенке чайника лучше не прикасаться – иначе ожог обеспечен.

Почему же при измерении почти 100-градусной температуры пирометр покажет втрое меньшее значение? Дело в том, что каждый объект характеризуется излучательной способностью, которая описывает его излучательные свойства. Излучательная способность чистого полированного алюминия – от 0,02 до 0,04, то есть в 25-50 раз меньше, чем у МЧТ (излучательная способность МЧТ, напомним, 0,99–0,998). А излучательная способность закопченной поверхности – порядка 0,95–0,98. То есть, полированная поверхность излучает практически в те же 25–50 раз меньше, чем закопченная. А пирометр трактует это как факт, что температура полированной поверхности гораздо ниже, чем у закопченной.

Для того, чтобы устранить эту 60-градусную погрешность (95°–35°=60°C), обычно пирометры снабжают устройством коррекции результатов по излучательной способности. Вам предлагается так или иначе, в зависимости от конструкции, ввести в пирометр значение излучательной способности того объекта, который вы измеряете. Если введенное значение соответствует истинному значению, то вы получите правильный результат.

Вот мы и добрались до первого препятствия – "если введенное значение соответствует истинному". А если не соответствует? А если не соответствует, то при измерении у вас возникнет дополнительная методическая погрешность за счет ошибочного ввода коэффициента излучения, определяемая соотношением

$$\frac{T_0 - T'_0}{T_0} = \frac{T_0 \cdot \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta \epsilon_\lambda(\lambda, T)}{\epsilon_\lambda^u(\lambda, T)}\right)}{1 + T_0 \cdot \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta \epsilon_\lambda(\lambda, T)}{\epsilon_\lambda^u(\lambda, T)}\right)}$$

Здесь  $T_0$  – действительное значение температуры объекта,  $T'_0$  – значение температуры объекта, получаемое при вводе ошибочного значения коэффициента излучения,  $\epsilon_\lambda^u(\lambda, T)$  – действительное

(соответствующее используемому пирометру) значение излучательной способности, а  $\Delta \epsilon_\lambda(\lambda, T)$  – ошибка ввода коэффициента излучения, т.е. разность между  $\epsilon_\lambda(\lambda, T)$  и тем значением, которое взято из справочной литературы.

В таблице приведены рассчитанные значения относительной погрешности как функции длины волны  $\lambda$  для трех значений действительной температуры, равных 1600К, 2000К и 2600К для вольфрама (значения  $\epsilon_\lambda(\lambda, T)$  взяты из [1]). Погрешность в определении излучательной способности выбиралась равной 10%.

Из анализа таблицы видно следующее. 10%-ная погрешность в измерении излучательной способности приводит к погрешности 0,6–1% в измерении действительной температуры объекта, если измерения проводятся на длине волны, равной 0,6 мкм, к погрешности порядка 1,5–2,5% при измерении на длине волны 1,5 мкм и 11–17% при измерении на длине волны  $\lambda=12$  мкм.

### ОТКУДА БЕРУТ ЗНАЧЕНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ?

А с какой точностью вы знаете излучательную способность своего объекта? Откуда вы берете ее значение? Этот вопрос сегодня является одним из самых сложных в пирометрии. В подавляющем большинстве случаев значение излучательной способности берут из таблиц, найденных в тех или иных литературных источниках, и из руководств по эксплуатации пирометров. При этом в таблицах нет никакой информации о том, в каком спектральном диапазоне проводились те или иные измерения. А коэффициент излучения – это величина, которая зависит не только от материала объекта, но и от спектрального диапазона пирометра.

Обратимся к рисунку. Очевидно, что кривая излучательной способности металла (кривая 1) пересекает кривую спектральной чувствительности яркостного фотодиодного пирометра (кривая 2) вблизи значения 0,7. В то же время кривую спектральной чувствительности пирометра на основе термоэлемента со спектральной чувствительностью



в интервале 8-14 мкм (кривая 3) она пересекает вблизи значения 0,23-0,25. Это означает, что если принять значение коэффициента излучательной способности металла 0,25 (более-менее правильное для второго пирометра), но ввести это значение в фотодиодный пирометр с Si-фотодиодом, то вы обязательно допустите ошибку в 250-300%! А вовсе не в 10%. Конечно, этот пример – крайний случай. Но он призван показать, что погрешность в определении коэффициента излучения может составлять десятки процентов!

Напомню, при измерении температуры излучателя-МЧТ, где излучательная способность известна с погрешностью менее 1%, пирометры могут показать результаты, отличающиеся от истинных не более чем на 0,25% и 1%. Но эти же пирометры при 10%-ной погрешности в определении излучательной способности измерят температуру вашего реального объекта с погрешностью от 1% до 12-17%. При этом меньшие значения соответствуют пирометрам с коротковолновыми фотодиодными приемниками, а большие – пирометрам спектрального диапазона 8-14 мкм. А если погрешность в измерении излучательной способности будет в два – два с половиной раза выше, то и погрешность в измерении температуры вашего объекта при измерении пирометрами со спектральным диапазоном 8-14 мкм превысит 25-30%! И это при том, что собственная инструментальная погрешность такого пирометра обычно на порядок полтора ниже этих значений.

Таким образом, предполагать, что погрешность измерения пирометром вашего реального объекта равна заявляемой производителем основной погрешности пирометра – это ошибка. Погрешность вашего измерения определится в первую очередь тем, насколько правильно вы определите значение коэффициента излучения измеряемого объекта. Его чаще всего вы сможете определить с погрешностью не менее 10-20%. А дальше все зависит от того, насколько велика дополнительная методическая погрешность за счет ошибочно введенного  $\epsilon$  у используемого вами пирометра. У пирометров, использующих коротковолновые фотодиодные приемники она низка. У пирометров спектрального диапазона 8-14 мкм она более чем на порядок выше. Поэтому если упомянутый в начале статьи однопроцентный пирометр выполнен на фотодиодном кремниевом приемнике, а четвертьпроцентный – на термоэлементе с диапазоном 8-14 мкм, то температуру вашего реального объекта, как это ни удивительно, точнее измерит не четвертьпроцентный, а однопроцентный прибор. За счет меньшей

дополнительной погрешности при ошибочно вводимом  $\epsilon$ . И величина этой дополнительной погрешности никак не окажется менее 1-2%.

## ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Теперь коснемся еще одной проблемы – зависимости результатов измерений пирометрами от температуры окружающей среды.

Приемниками излучения пирометров являются чаще всего полупроводниковые элементы – болометры, фотодиоды, пироэлектрики, термоэлементы. И как у всяких полупроводниковых компонентов, их характеристики зависят от температуры окружающей среды. У приемников это выражается в том, что при изменении температуры среды выходной сигнал приемника изменяется, при том что входной оптический сигнал остается неизменным.

По опыту замечу, изменение температуры окружающей среды на каждые 10°C у пирометра с приемником из Si-фотодиода приводит к дополнительной погрешности порядка 1% при температурах объекта 500-1000°C. То есть, идеально откалиброванный при температуре 22°C пирометр, с основной погрешностью 0,25%, при 32°C будет характеризоваться погрешностью порядка 1%, а при 42°C – погрешностью порядка 2% и т.д. Для пирометров с приемниками на основе InGaAs-фотодиодов и термоэлементов дополнительная погрешность на каждое увеличение температуры окружающей среды на 10°C будет чуть больше – порядка 1,3-1,5%. То есть, если в пирометре не предусмотрена возможность исключать появление описанной дополнительной погрешности, можете смело рассматривать экстремально низкие значения его погрешностей, заявленные производителями, как рекламный ход.

Скорее всего, эти заявленные погрешности (от 0,1% до 0,4%) – правда. Но лишь при окружающей температуре вблизи 21-23°C. А если у вас в цехе зимой 10°C, а летом 33°C, то ни о каком достижении десятых долей процента говорить нельзя.

О каких мерах исключения дополнительной погрешности возникающей из-за изменения температуры окружающей среды, может идти речь? В первую очередь это термостабилизация приемного узла. Достаточно обеспечить стабильность температуры приемного узла с точностью 1-2 градуса – и никакой дополнительной погрешности за счет колебаний температуры окружающей среды не будет, о ней можно забыть.

Второй путь – введение соответствующих поправок. В пирометре должен быть датчик температуры окружающей среды и соответствующая программа,



корректирующая чувствительность приемника. Причем именно чувствительность, а не смещение по постоянному току.

Если хоть один из этих механизмов в пирометре есть, то это гарантированно отражено в его описании/руководстве по эксплуатации. Если такой информации в фирменном руководстве вы не найдете – будьте уверены, прибор имеет дополнительную процентную погрешность на каждые 10°C изменения температуры окружающей среды, что бы при этом вам ни говорили менеджеры, продающие его.

Иногда они, правда, говорят, что предлагаемый прибор сделан мировым лидером, имеющим большой опыт, и что приемники пирометра этого лидера не имеют такой погрешности. Про лидеров – почти, наверняка, правда, и про большой опыт – тоже. А вот про то, что приемники мировых лидеров лучше остальных, – мягко говоря, неправда. Законы физики одинаковы на всех континентах. И температурный уход Si-фотодиодов, к примеру, практически одинаков, будь то прекрасный фотодиод фирмы Hamamatsu или менее ценный, но вполне качественный отечественный ФД-24К выпуска 30-летней давности.

### ВЛИЯНИЕ НЕПРОСЛЕЖИВАЕМОСТИ К ПЕРВИЧНЫМ ЭТАЛОНАМ

О том, что непрослеживаемость пирометров к первичным эталонам вносит свои дополнительные погрешности, метрологи заговорили в последние 10 лет. Дело в том, что если вы калибруете пирометр на излучателе, который характеризуется, к примеру, 0,5%-ной погрешностью, то погрешность калибруемого прибора не может быть ниже 0,5%. Даже если он идеально калиброван на этом излучателе, и его показания расходятся с показаниями излучателя менее чем на 0,1%, погрешность пирометра будет не 0,1%, а 0,5%. Ведь основная погрешность – это не погрешность относительно излучателя, а погрешность относительно международной температурной шкалы. А с ней упомянутый излучатель расходит в данном примере на 0,5%.

Долгое время западные производители не считали нужным сверять свои образцовые излучатели с национальными эталонами температуры. Сейчас метрологи заставляют их это делать. Но информация о погрешностях сличений до нас не доходит. А жаль. Если, к примеру, кто-то из мировых лидеров предлагает вам прибор с основной погрешностью 0,1%, то это значит, что излучатель, на котором был калиброван этот прибор, должен иметь погрешность хотя бы втрое меньшую. А есть ли такой

излучатель у этого лидера? С основной погрешностью 0,03%?! И подкрепляется ли это сертификатом соответствующего главного метрологического института страны, в которой работает этот производитель? Или это только слова дилера, продающего вам прибор?

### ВЛИЯНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И ВИЗИРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для упрощения конструкции большинство пирометров делают с нефокусируемой оптической системой. Плоскость, которая сопряжена с плоскостью приемника, обычно находится на расстоянии 0,5 м или 1 м от объектива пирометра. Именно в этой плоскости размер измеряемого объекта минимален. И именно на этом расстоянии от излучателя обычно располагается пирометр во время калибровки.

Но производители обычно умалчивают, что при изменении расстояния от пирометра до объекта результат измерения изменяется, даже если температура объекта остается неизменной [3]. Это происходит потому, что площадь объекта, с которой пирометр принимает тепловые лучи, и телесный угол, под которым из точек объекта видна выходная линза объектива пирометра, изменяются при варьировании расстояния несинхронно. Поскольку расчет реальной площади объекта, с которой пирометр принимает тепловые лучи, – весьма затруднительное занятие, соответствующие математические модели, отражающие изменение теплового потока с изменением расстояния, не разработаны. Но это не значит, что этого изменения не существует. Оно существует, и при изменении расстояния с 1 м до 2 м результат измерения пирометром со спектральной характеристикой, описываемой кривой 3 (см. рисунок), может измениться на 2–4%. Для пирометра со спектральной характеристикой, описываемой кривой 2, эта величина заметно ниже (немного менее 0,5%). Как видите, и за счет этого фактора экстремально низкие значения погрешности измерений (0,1–0,3%) окажутся для вас нереализуемыми. То есть за счет того, что вы измеряете объекты на иных расстояниях, чем то, на котором калибровали пирометр, вы получаете реальную заметно большую погрешность, чем основная погрешность, заявленная производителем.

Справедливости ради надо отметить, что у правильно сконструированных пирометров с фокусируемой оптической системой эта погрешность отсутствует.

Что касается системы визирования, то учтите, что ее влияние сказывается при измерении

малоразмерных объектов. Дополнительную погрешность в несколько процентов вы можете получить, если поле зрения пирометра на выбранном расстоянии сопоставимо с размером объекта, а вы при этом не можете точно навести пирометр на объект измерения из-за неудачно выбранного визира. Поэтому, если размеры объекта минимальны, используйте пирометры с хорошим беспараллаксным визиром.

### ВЛИЯНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА

Есть еще один неприятный фактор, влияющий на точность измерения. Это – человеческий фактор. Не сумели установить без ошибки коэффициент излучения – результат измерения будет включать в себя погрешность, причем иногда значительную [4]. Избавиться от этой погрешности позволяют пирометры спектрального отношения, лишённые органов коррекции.

### ВЛИЯНИЕ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ ПРИБОРА

Если вы попытаетесь измерить температуру алюминиевой заготовки обычным пирометром, не предназначенным для измерения температуры алюминия, скорее всего, результат будет очень плохим, погрешность измерения превысит все разумные границы. Это произойдет потому, что излучательная способность алюминия очень низка, на уровне 0,02–0,03. То есть сигнал от алюминиевой заготовки в 30–50 раз меньше, чем от МЧТ. Чтобы скомпенсировать ослабление за счет излучательной способности, сигнал, пришедший на пирометр, надо усилить в 30–50 раз. Одновременно с этим во столько же раз возрастут и присущие пирометру

шумы. И если пирометр не содержит технических решений, минимизирующих эти шумы, погрешность измерения будет на один-два порядка больше собственной инструментальной погрешности пирометра.

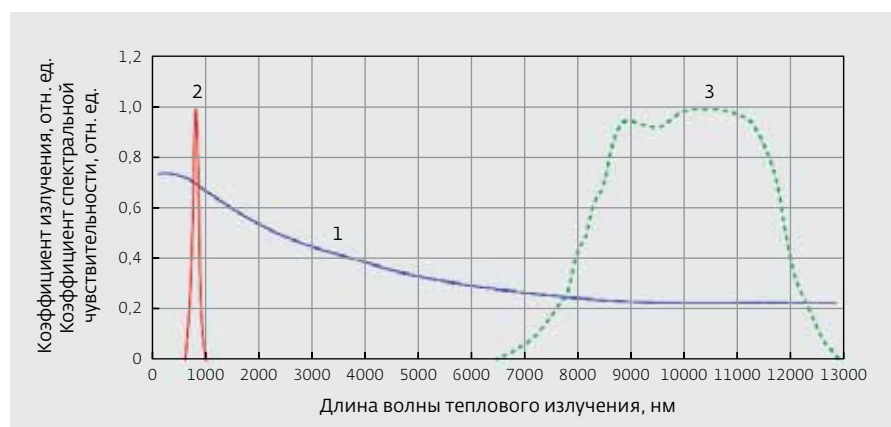
Еще один пример – измерение температуры металлов пирометром, характеристика которого подобна кривой 3 (см. рисунок). Дело в том, что у большинства металлов излучательная способность с ростом  $\lambda$  снижается до значений 0,1–0,3. Погрешность измерения излучательной способности величиной 0,05 составляет в данном случае от 16 до 50%, что соответствует дополнительной погрешности в первом приближении от 15 до 40–50%. Поэтому приобретая пирометр со спектральным диапазоном 8–14 мкм для измерения температуры металла, помните, что даже получить одно-двухпроцентную погрешность окажется крайне затруднительно – что "однопроцентным" пирометром, что "четвертьпроцентным".

В то же время, по данным НПУЦ "Энергомет" [5], излучательная способность многих огнеупоров в этом спектральном диапазоне приближается или превышает значение 0,9. И для температуры таких объектов пирометр со спектральным диапазоном 8–14 мкм вполне пригоден. Погрешность 0,2–0,3% получить вам, скорее всего при этом не удастся, но на уровне 1–2% – вполне реально.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, мы рассмотрели шесть различных причин появления дополнительных погрешностей от 1–2% до 15% и более при измерении температуры пирометром. Эти погрешности, всегда имеющие место в процессе измерения реальных объектов, сведут на нет все преимущества пирометра с экстремально низкой погрешностью (на уровне 0,1–0,25%).

Так стоит ли гнаться за "четвертьпроцентными" (или еще более точными) пирометрами? Весь вопрос в том, какую задачу вы пытаетесь решить. Если оснастить поверочную лабораторию – то да, безусловно. Вы будете измерять таким пирометром температуру МЧТ, поэтому влияние излучательной способности на результат измерения исключается. Обычно в лаборатории поддерживается нормальная температура окружающей



Сопоставление спектральной излучательной способности типичного низколегированного металла (1) [2], спектральной чувствительности яркостного фотодиодного пирометра (2) и пирометра на основе термоэлемента 8–14 мкм (3)



среды, поэтому ее изменения влияют минимально. Прибор вы установите на том расстоянии, на котором рекомендует производитель, и влияние изменения расстояния тоже будет исключено. И тогда прекрасные точностные характеристики прибора будут реализованы. Если прибор предназначается для измерения не МЧТ, а реальных объектов на производстве или в научных исследованиях, – то нет.

Названные условия измерений приведут к тому, что погрешность результатов будет не доли процентов, а минимум единицы, в предельно же нехорошем стечении обстоятельств – даже 15% и более. Поэтому надо ориентироваться не на минимум погрешности, а на специфические особенности прибора, которые делают его либо неудачным для вашего случая, либо, наоборот, оптимальным. И здесь справедливо следующее правило: чем более коротковолновым является спектральный диапазон используемого прибора, тем меньше сказываются при работе с ним все дополнительные методические погрешности. Если вы можете позволить себе не интересоваться температурами ниже 500°C, выбирайте пирометр на основе кремниевого фото диода, у него дополнительные погрешности минимальны. Если же вам все же нужно вести измерения

в диапазоне от 200 до 500°C, то используйте пирометр на InGaAs-фото диоде. У него погрешности выше, чем у предыдущего, но всего раза в полтора. Ну а если без измерения температур вблизи комнатной вам не обойтись, вам придется использовать пирометр спектрального диапазона 8-14 мкм со всеми его погрешностями (другого-то ничего для этого температурного диапазона нет). Но не рассчитывайте на точные измерения этим пирометром объектов, нагретых до температуры 500°C и выше.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Излучательные свойства твердых материалов. Под ред. А.Е.Шейндлина – М.: Энергия, 1974.
2. **Беленький А.М., Дубинский М.Ю., Ладыгичев М.Г., Лисиенко В.Г., Щелоков Я.М.** Измерение температуры: теория, практика, эксперимент: Справочное издание. Т.2. – М.: Теплотехник, 2007.
3. **Линеверг Ф.** Измерение температур в технике: Справочник/ Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980.
4. **Фрунзе А.В.** Влияние методических погрешностей пирометра на выбор прибора. – Фотоника, 2012, № 3, с.46–51.



5. Беленький А.М. и др. Радиационные характеристики объектов контроля температуры в металлургии: Справочник. – М.: Изд-во МИСИС, 2000.

## НОВЫЕ КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА "ТЕХНОСФЕРА"



Цена 975 р.

### МИР ФИЗИКИ И ТЕХНИКИ ПРАКТИКА ПРЕЦИЗИОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Вакс Е.Д., Миленький М.Н., Сапрыкин Л.Г.

Москва: Техносфера,  
2013, – 696 с. + 12 с.цв.вклейки,  
ISBN 978-5-94836-339-4

Издание осуществлено при поддержке  
ООО НПЦ "Лазеры и аппаратура ТМ"

*Книга основана на результатах исследований в ЭНИМС и в НПЦ "Лазеры и аппаратура ТМ" и на анализе работ отечественных и зарубежных исследователей. Представлен обзор областей применения лазерной прецизионной обработки. Изучены закономерности лазерного сверления, резания, фрезерования и разделения материала импульсами лазерного излучения с длительностью от единиц миллисекунд до сотен фемтосекунд. Приведены экспериментально установленные режимы оптимальной обработки материалов с использованием импульсных и непрерывных лазеров. Объяснена методика подбора таких режимов. Рассмотрены технологические установки НПЦ "Лазеры и аппаратура ТМ".*

*Книга предназначена для специалистов научно-исследовательских и промышленных предприятий, для студентов и аспирантов, изучающих процессы лазерной обработки.*

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319 Москва, а/я 91; ☎ (495) 956-3346, 234-0110; [knigi@technosfera.ru](mailto:knigi@technosfera.ru), [sales@technosfera.ru](mailto:sales@technosfera.ru)



# WHAT'S WORTHWHILE TO KNOW WHEN DECIDING ON A PYROMETER

A. Frunze, Ph.D. of Engineering Science, NNTP "TERMOKONT"

Within the process of measuring the temperature of real objects the reasons that might negate the benefits of a pyrometer with an extremely low error arise. They will lead to that the error of the measurement results will make not shares of a percent, but even 10% or more. Therefore, when deciding on a pyrometer you should focus not on the minimum error mentioned in its passport, but on the specific characteristics of the device, which will make it the best for your needs and will drive additional errors to a minimum. And remember, this question is better to discuss with an expert. He will point to the problems which the sales manager will keep back.

In their struggle for a consumer manufacturers strive to improve the parameters of their products. A precision (it's more accurate to say the measurement error), along with the range of measured temperatures are the main parameters of the pyrometer. And of course, declaring a lower accuracy than competing products, the manufacturer speaks openly to the consumer that his product is better than its equivalent from a competitor.

This is right in the zero approximation. But pyrometry is a special branch of the measurements, where everything is so not simple and to make the wrong decision is very easy because of ignorance of the features inherent to this kind of measurements.

## THE BASIC ERROR OF PYROMETERS – WHAT IS IT?

To begin with, the manufacturer states that the measurement errors are the errors that are inherent in their products at verification and calibration with perfect radiators, so-called "black bodies" (BBM – model of the "black body"). These "black bodies" are the mandatory equipment of any calibration laboratory. Their main feature is that their emissivity factor (otherwise – emissivity) is almost equal to one (typical values: 0.990-0.998) at any wavelength. So when measuring the temperature of these blackbodies in the laboratory at ambient temperature 20-25° C, the pyrometers do demonstrate their accuracy characteristics, which are called the basic error of tool measurement.

Thus, the suppliers offered you two pyrometers – one with the basic error of 0.25%, and the other – with the basic error of 1%. Financially you can afford any of them. What to choose? Mindful that the avaricious pays twice, you are likely to choose the first – because its error value is lower, so it is better. But, as I have already said, pyrometry is a special branch of the measurements, where everything is not so simple.

## IMPACT OF EMISSIVITY

Let's start with the fact that the measurement result of the pyrometer is very much influenced by the emissivity of the measured object. We'd like to recall what it is. Imagine the following situation: we have an aluminum kettle with polished walls, but one side has a large stain of soot (kettle somehow fell into the fire, was not removed immediately, stubborn soot was not scrubbed as it didn't influence the rate of boiling). So, if direct the pyrometer on the smoked surface of the boiling kettle, the pyrometer will show 90-95° C. When directed on a clean polished surface the pyrometer will display the result approximately 30-35° C. And please note the kettle is boiling at the moment, that is the water inside it has a temperature of about 100° C, and the wall of the kettle is better not touch otherwise skin burn is guaranteed.

Why does the pyrometer show three times less value with the measurement of a nearly 100-degree temperature? The fact is that each object is characterized by the emissivity, which describes its emission properties. The emissivity of pure polished aluminum is within the range 0.02 to 0.04, that is 25-50 times less than that of MBB (emissivity of MBB is 0.99 – 0.998, as you remember). A sooty surface emissivity is about 0.95-0.98. That is, the polished surface emissivity is nearly the same 25-50 times less than that of sooty one. And the pyrometer treats it as a fact that the temperature of the polished surface is much lower than that of sooty.

In order to remove this 60-degree error (95°-35° = 60°C), the pyrometers are usually provided with a unit adjusting results by

emissivity. You are invited anyway, depending on the design, to introduce to the pyrometer the emissivity of the object you are measuring. If the introduced value corresponds to the true value, then you will get the correct result.

So we got to the first obstacle – "if the value entered corresponds to the true one." And if it does not? And if it does not, then the measurement you have an additional methodical error owing to faulty input of the emissivity factor defined as:

$$\frac{T_0 - T'_0}{T_0} = \frac{T_0 \cdot \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T)}{\epsilon_\lambda^u(\lambda, T)}\right)}{1 + T_0 \cdot \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T)}{\epsilon_\lambda^u(\lambda, T)}\right)}$$

Where  $T_0$  – the actual temperature of the object,  $T'_0$  – the temperature of the object obtained when entering an incorrect values of the emissivity factor,  $\epsilon_\lambda^u(\lambda, T)$  – the actual (as appropriate for the pyrometer) emissivity, and  $\Delta\epsilon_\lambda(\lambda, T)$  – input of the emissivity factor, ie the difference between  $\epsilon_\lambda(\lambda, T)$  and the value taken from reference books.

The table shows the calculated values of the relative error as a function of wavelength  $\lambda$  for three values of the actual temperature equal to 1600K, 2000K and 2600 K for tungsten (values are taken from [1]). The error in determining the emissivity was chosen to be 10%.

The following is seen from the analysis of the table. 10% error in measuring the emissivity leads to an error of 0.6-1% in the measurement of the actual temperature of the object, if the measurements are made at a wavelength of 0.6 microns, to an error of 1.5-2.5% in the measurement at a wavelength of 1.5 microns, and 11-17% when measured at a wavelength of  $\lambda = 12$  microns.

## WHERE IS THE VALUE OF EMISSIVITY TAKEN FROM?

And how precisely DO you know the emissivity of the object? How do you get its value? This issue is one of the most complex in pyrometry now. In most cases, the emissivity is taken from tables found in various literature sources and from manuals of the pyrometers. In the tables, there is no information on the spectral range in which certain measurements are performed. And the emissivity factor is the value which depends not only on the material of the object, but also on the spectral range of the pyrometer.

Let's refer to the figure. Obviously, the metal emissivity curve (curve 1) intersects the curve of spectral sensitivity of brightness photodiode pyrometer (curve 2) close to the value 0.7. At the same time it intersects the spectral sensitivity of the pyrometer based on the thermocouple with spectral sensitivity in the range of 8-14 mm (curve 3) near the value of 0.23-0.25. This means that, if we take the value of emissivity factor of the metal as 0.25 (more or less correct for the second pyrometer), but enter it in the photodiode pyrometer with Si-photodiode, we are sure to make a mistake in 250-300%! And far from 10%. Of course, this example is an extreme case. But it is intended to show that the error in determining the emissivity factor can make tens of percent!

I remind, that when measuring the temperature of the BBM where the emissivity is known with an error of less than 1% the pyrometers mentioned at the beginning of the Section can show results that differ from true no more than of 0.25% and 1%. But the same pyrometers measure the temperature of your real object with an accuracy range of 1% to 12-17% at 10% error in determining





of emissivity. In this case the lower values correspond to short-wavelength pyrometer with photodiode detectors, and large values – to the pyrometer of spectral range of 8-14 microns. And if the error in measuring the emissivity will be two – two and a half times higher, the error in measuring the temperature of your object will exceed 25-30% when measuring with the pyrometers with spectral range 8-14 microns! And it is so despite the fact that the own instrumental error of the pyrometer is usually by the order or more below these values.

Thus, to assume that the pyrometer measurement error of your real object is equal to the basic pyrometer error stated by the manufacturer is a mistake. The error of your measurements will be determined primarily by how well you will define the emissivity factor of the measured object. Most often it can be identified with an error less than 10-20%. And then it all depends on how big the additional methodical error is owing to a faulty input of  $\epsilon$  for the pyrometer used. It is low in pyrometers using shortwave photodiodes. It is more than by order higher in the pyrometers of spectral range 8-14 microns. Therefore, as mentioned in the beginning of the article if the pyrometer with one percent error is made on a silicon photodiode receiver and with a 0.25 % error is made on the basis of the thermocouple with a range of 8-14 microns, the temperature of your real object, surprisingly will be more accurately measured by 1% device, owing to the smaller additional error in faulty input  $\epsilon$ . And the value of this additional error can't be less than 1-2%.

### AMBIENT TEMPERATURE EFFECT

Now let's touch another problem – depending on the results of measurements with pyrometers on the ambient temperature.

Receivers of pyrometer radiation are usually semiconductors – bolometers, photodiodes, pyroelectrics, thermocouples. And like any semiconductor components, their characteristics depend on the ambient temperature. As for the receivers it is reflected in the fact that when measuring the temperature of the medium receiver output signal changes, despite the fact that the input signal remains unchanged.

A posteriori I'll say, temperature change for every 10° C in the pyrometer with the receiver of Si-photodiode leads to additional error of about 1% at 500-1000° C of object temperatures. That is perfectly calibrated pyrometer at 22° C with the basic error of 0.25% will be characterized by an error of about 1% at 32° C and an error of about 2%, at 42° C etc. An additional error for each increase of ambient temperature by 10° C will be a little more about 1.3-1.5% for pyrometers with receivers based on InGaAs-photodiodes and thermocouples. That is, if the measures are not taken to eliminate the occurrence of the described additional error for the pyrometer you can safely consider extremely low error values of pyrometers, claimed by their manufacturers as a gimmick.

Most likely, these alleged errors (from 0.1% to 0.4%) are the truth. But it is only when the ambient temperature is around 21-23° C. If you have 10° C in winter and 33° C in summer in your workshop, then to talk about tenths of a percent error is not possible.

What measures of excluding of additional error owing to ambient temperature can be taken? First of all this is heat setting of receiver unit. It'll be enough to ensure the stability of the temperature receiver unit with an accuracy of 1-2 degrees – and no additional error owing to ambient temperature fluctuations will be, you can forget about it.

The second way is to introduce relevant amendments. The pyrometer should have the ambient temperature sensor, and the appropriate program that corrects receiver sensitivity. And it is sensitivity, but not DC offset.

If one of these mechanisms is available in the pyrometer is, then it is reflected in its description / manual by all means. If you don't find the information in the company's manual – be sure the device has the additional percentage error for every 10° C of ambient temperature changes, whatever the managers, selling it tell you.

Sometimes, however, they say that the proposed device is manufactured by world leaders with extensive experience, and that this pyrometer receivers do not have this error. Concerning leaders it is almost certainly true, as well as about the great experience. But as for the fact that world leaders' receivers are

better than the others, gently speaking, is not true. The physical laws are the same in all the continents. And temperature drift of Si-photodiodes, for example, is almost the same, whether it's a photodiode of the wonderful company Hamamatsu, or less valued, but of good quality domestic FD-24K produced 30 years ago.

### IMPACT OF UNTRACEABILITY TO BASIC STANDARDS

In the recent 10 years metrologists have been talking that untraceability of the pyrometers to primary standards introduces the additional errors. The fact is that if you calibrate the pyrometer on the blackbody model, characterized, for example, by 0.5% error, the error of the calibrated instrument can not be lower than 0.5%. Even if it is perfectly calibrated for this blackbody model, and its records differ from the records of the model by less than 0.1%, the error of the pyrometer will be not 0.1%, but 0.5%. As basic error is not an error against blackbody model, but the error with respect to the international temperature scale. And the said blackbody model diverges with the scale by 0.5% in this case.

For a long time, Western manufacturers do not consider it necessary to check their reference blackbodies with national standards of temperature. Now metrologists make them do it. But the information on the errors of comparisons does not reach us. Unfortunately. If, for example, one of the world leaders offers you a device with a basic accuracy of 0.1%, it means that the blackbody, which the device was calibrated against should have an accuracy of at least three times less. Does the leader have such a blackbody? With the basic error of 0.03%?! And is it confirmed by the certificate of conformity of the main metrology institute of the country where the manufacturer is working? Or are these only words of dealers selling you the product?

### IMPACT OF OPTICAL AND VIEWING CHARACTERISTICS

To simplify the design most pyrometers are manufactured with extra-focal optical system. The plane associated with the plane of the receiver, is usually located at a distance of 0.5 m or 1 m from the lens of the pyrometer. It is this plane where the size of the object being measured is minimal. And it is at this distance from the source the pyrometer is usually located during calibration.

But manufacturers are usually silent, that the result of the measurement changes at changing the distance from the pyrometer to the object, even if the temperature of the object remains unchanged. [3] This is because the area of the object from which the pyrometer takes the heat rays, and the solid angle with which objective output lens of the pyrometer is visible from the points of the object change non-synchronously at varying the distance. Since the calculation of the actual area of the object the pyrometer takes the heat rays from, is a very difficult exercise, appropriate mathematical models to reflect the change of the heat flux with the distance, are not developed. But it does not mean that this change does not exist. It does exist, and when the distance changes from 1 m to 2 m measurement of the pyrometer with spectral response 3 (see figure) can change by 2-4%. For the pyrometer with spectral response described by curve 2, this value is much lower (slightly less than 0.5%). As you can see, and owing to this factor extremely low values of the measurement errors (0.1-0.3%) would be infeasible for you. That is due to the fact that you are measuring objects at distances other than the one on which the pyrometer is calibrated, you are actually getting much larger error than the basic error, declared by the manufacturer.

It is fair to note that this error is absent at a properly designed pyrometer with the focused optical system.

With regard to the viewing system, keep in mind that its impact is implied in the measurement of small objects. Additional error of a few percent can be obtained if the viewing area of the pyrometer at a selected distance is comparable to the size of the object, and thus you can not exactly bring pyrometer for measuring object owing to unsuccessfully chosen viewfinder. Therefore, if the object is of minimum size, use pyrometers with good reflex viewfinder.





## HUMAN FACTOR PERFORMANCE

There is another unpleasant factor affecting the accuracy of measurement. This is the human factor. Establish emissivity factor with an error and the measurement will include the error, sometimes even significant. [4] The pyrometers of spectral relation devoid of correction can help to get rid of this error.

## EFFECT OF DEVICE SPECIALIZATION

If you try to measure the temperature of the aluminum billet with conventional pyrometer, not used for measuring the temperature of aluminum, most likely the result will be very poor, the measurement error exceeds all reasonable limits. This is because the emissivity of aluminum is very low, at 0.02-0.03. That is, the signal from aluminum billet is 30-50 times less than that of BBM. To compensate for the attenuation due to the emissivity it is necessary to increase the signal, which came to the instrument, 30-50 times. At the same time the pyrometer inherent noises increase by the same factor. And if the pyrometer does not have technical solutions to minimize these noises, the measurement error will be one or two orders more than pyrometer own instrumental error.

Another example is measurement of metals temperature with a pyrometer, which characteristic is similar to the curve 3 (Fig. 1). The fact is that emissivity of most metals is reduced up to 0.1-0.3 with increasing of  $\lambda$ . Measurement error of the emissivity with value of 0.05 make from 16 to 50% in this case, which corresponds to an additional error, from 15 to 40-50% in the first approximation. Therefore buying a pyrometer with a spectral range of 8-14  $\mu\text{m}$  to measure the temperature of the metal, remember that to even get a one-two-percent error will be extremely difficult with 1 % pyrometer as well as with 0.25 % one.

At the same time, according to NPUTS "Energomet" [5], the emissivity of the many refractory materials in this spectral range is close to or exceeds the value of 0.9. And pyrometer with a spectral range of 8-14  $\mu\text{m}$  is good enough for the temperature of such objects. Probably you can't get 0.2-0.3% error, but the level of 1-2% is quite real.

## CONCLUSION

Thus, we have considered six different reasons that lead to additional errors from 1-2% to 15% and more at temperature measuring with a pyrometer. These errors always taking place during the measurement of real objects, will negate the benefits of a pyrometer with an extremely low error (at the level of 0.1-0.25%).

So is it worth chasing 0.25 % (or more accurate) pyrometers? The question is, what problem you are trying to solve. If you try to equip the calibration laboratory - then yes, absolutely. You'll measure the temperature of BBM with such a pyrometer, so the impact of the emissivity to the measurement is excluded. Usually normal ambient temperature is maintained in laboratory, so its changes will have minimal impact. You'll set the device at the distance the manufacturer recommends, and the impact of changes of the distance will also be excluded. And then the device great precision characteristics will be realized.

If the instrument is designed to measure not BBM but real objects in industry or research - then no. The mentioned reasons will lead to the fact that the error of the measurement results will not be parts of a percent, but at least unities, and at the worst set of circumstances - even 15% or more. Therefore, we should focus not on the least error, but on the specific characteristics of the device, which makes it a failure or vice versa, the best for your case. And here we have the following rule: the more short-wavelength range is used by the device, the less impact of any additional methodological errors when working with it. If you can afford not to be interested in temperatures below 500°C, choose a pyrometer based on a silicon photodiode, its additional errors are minimal. If you do need to make measurements in the range of 200 to 500° C, use a pyrometer on InGaAs-photodiode. Its error is higher than the previous one, but only half as large again. Well, if you need to measure near room temperatures, you have to use a pyrometer with spectral range of 8-14 microns, with all its errors (there is nothing available for this temperature range). But do not count on precise measurements of facilities, heated to a temperature of 500° C and above made with this pyrometer. ■

