
Обзор состояния и научно-технические направления развития в приборостроении и системотехнике

А.В. Фрунзе

О ДАЛЬНЕЙШИХ ПУТЯХ РАЗВИТИЯ ПИРОМЕТРИИ

Аннотация

Обоснована необходимость создания нового класса СИ – средств измерения спектральной излучательной способности, первичного эталона излучательной способности, рабочих эталонов, поверочных схем.

Рассмотрены причины возникновения непрослеживаемости энергетических пирометров и пирометров спектрального отношения с органами регулирования отношения к первичному эталону единицы температуры. Показано, что главной причиной является невозможность контроля правильности алгоритма коррекции по излучательной способности, в том числе спектральной. Показано, что без упомянутого первичного эталона излучательной способности невозможно восстановление прослеживаемости пирометров к первичному эталону единицы температуры.

Ключевые слова: излучательная способность, специализированные СИ спектральной излучательной способности, первичный эталон единицы температуры, первичный эталон излучательной способности, прослеживаемость, пирометры.

Как известно, пирометрией называется область науки и техники, занимающаяся измерением температуры объектов по их тепловому излучению. В основе пирометрии лежат известные законы Планка, Вина, Рэлея-Джинса и Стефана-Больцмана. Они демонстрируют связь энергетического потока от объекта с его температурой.

Однако на упомянутую величину энергетического потока прямым образом влияет еще одна характеристика излучающего объекта – его излучательная способность. Она показывает, какую часть излучения от идеального излучателя (абсолютно черного тела – АЧТ) составляет излучение рассматриваемого объекта при равной с АЧТ температуре. В общем случае излучательная способность изменяется с изменением длины волны излучения от объекта, и таких объектов в природе и в технике если не большинство, то чрезвычайно много.

Поскольку излучательная способность прямо влияет на поток излучения от нагретого объекта, без знания ее точно измерить температуру объекта можно лишь в частном случае – если объект является «серым», т. е. его излучательная способность является константой во всем диапа-

зоне чувствительности приемников излучения пирометра и измерение осуществляется пирометром спектрального отношения. В остальных случаях (а их в реальной пирометрии – подавляющее большинство) без знания излучательной способности невозможно осуществлять измерения, при которых погрешность будет гарантированно ниже заданного уровня. А поскольку излучательная способность зависит от нескольких факторов – от длины волны излучения, химического состава материала объекта, состояния его поверхности, и даже технологии получения этого состояния, то на практике оказывается, что для конкретного объекта излучательная способность изначально или вообще неизвестна, или известна с погрешностью, оценить которую зачастую очень сложно.

Таким образом, отсутствие достоверной информации об излучательной способности любого объекта, температуру которого необходимо измерять методами пирометрии, является ключевой проблемой пирометрии в целом. Без решения этой задачи пирометрия не соответствует требованиям, предъявляемым современной метрологией к разделам науки, связанными с измерениями.

Попытки решения задачи о нахождении излучательной способности реальных объектов

Первые попытки вычислить излучательные характеристики объектов были сделаны в рамках электромагнитной теории Максвелла. В работах Друде была установлена связь между монокроматической излучательной способностью, с одной стороны, и удельным электрическим сопротивлением материала и длиной волны излучения, с другой стороны. Ашкинассом получено соотношение, связывающее нормальную интегральную излучательную способность с удельным электрическим сопротивлением материала и температурой излучающего объекта. Эти работы относятся к началу XX века.

Полученные теоретические результаты находились в неплохом соответствии с экспериментальными данными в диапазоне длин волн свыше 4...5 мкм. На более коротких волнах теоретические результаты сильно расходились с экспериментальными.

В работах Хагена и Рубенса, Фула, Девиссона и Уикса, Шмидта и Эккерта полученные Друде и Ашкинассом результаты были несколько уточнены. Ряд дополнительных уточнений для этих соотношений был получен Б.С. Садыковым. Однако всего этого оказалось недостаточно, чтобы привести теорию в соответствие с экспериментальными данными в самом важном для пирометрии диапазоне длин волн – от 0,3...0,5 до 1...1,5 мкм. Поэтому в справочнике под ред. А.Е. Шейндлина [1, с. 29] сделан вывод, что «... даже в идеальном случае твердых веществ с оптически гладкой поверхностью ни электронная, ни квантовая теории не могут в огромном большинстве случаев обеспечить точность, необходимую для практических расчетов. Единственным способом получения надежных данных по излучательным характеристикам различных конструкционных материалов в настоящее время является эксперимент». Этот вывод не потерял своей актуальности и сейчас, спустя 30 лет после того, как он был сформулирован.

Экспериментальные исследования, посвященные излучательной способности, берут начало с работ Вортинга [2], относящихся к 1917 году. Он изучал спектральную излучательную способность вольфрама. Однако бум экспериментальных исследований в этой области приходится на период с 50-х по 70-е годы XX столетия. Большое коли-

чество экспериментальных результатов, полученных до конца 70-х годов прошлого века, обобщено в справочнике под ред. А.Е. Шейндлина [1]. Немало работ в этой области появилось и в последние два десятилетия прошлого века. Однако главной задачи – получения достоверных данных об излучательной способности ЛЮБОГО объекта, измерение которого методами пирометрии может быть востребовано – все эти данные, к сожалению, не решают.

Проблемы использования имеющихся экспериментальных данных об излучательной способности реальных объектов

Как было упомянуто, излучательная способность зависит не только от длины волны излучения и химического состава излучающего объекта, но и от состояния его поверхности, точнее, от степени ее шероховатости. Чем более шероховатой является излучающая поверхность, тем ближе ее излучательная способность к излучательной способности АЧТ. Этот вывод совершенно очевиден. Но в то же время связь между параметрами шероховатости и излучательной способностью серьезно не исследовалась, видимо, вследствие «чудовищного» разнообразия подлежащих исследованию материалов в совокупности с большой вариантно-стью состояния их поверхности.

Как показано в справочнике под ред. А.Е. Шейндлина [1], для исключения неоднозначности экспериментальных данных, получаемых различными исследователями при измерении излучательной способности металлов, принято измерения проводить на полированной поверхности образца. Однако там же, [1, с. 300], отмечается, что результаты, полученные на механически полированных образцах меди, заметно отличаются от результатов с образцов, прошедших электрополировку. Предполагаемая причина тому – наклеп поверхностных слоев материала при механической обработке. То есть даже выполнение условия полированности образца не снимает неоднозначности экспериментальных результатов.

Таким образом, прямой перенос в производственные цеха результатов, получаемых в исследовательских работах, будет сопровождаться погрешностями, не контролируемые по величине вследствие нетождественности материалов образцов на столе исследователя и в условиях реального производства. Это приводит к тому,

что все многообразие имеющихся результатов измерений излучательной способности не является метрологически значимым, поскольку оператор измерительного прибора не располагает данными о погрешности, которая возникнет вследствие различия физико-химических характеристик и свойств поверхности измеряемого им объекта и того, который описан в той или иной научной работе.

О необходимости специализированных СИ для измерения излучательной способности

Сказанное выше позволяет сделать следующий вывод. Для получения метрологически значимых результатов измерений излучательной способности необходимо создание специализированных СИ, предназначенных для измерения излучательной способности. Наличие у пользователя подобного СИ, поверенного и характеризующегося указанным в паспорте пределом допускаемой погрешности, снимает вопрос о том, откуда взять достоверные данные об излучательной способности объекта, который пользователю предстоит измерять пирометром. При этом погрешность измерений будет определяться не научной степенью или званием измеряющего, а паспортными данными СИ и строгостью выполнения пользователем соответствующей методики измерений.

Нетрудно показать, что для конкретного энергетического пирометра при измерении температуры объекта значение излучательной способности ϵ_r , используемое для коррекции результата измерения по излучательной способности, определяется соотношением

$$\epsilon_r = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot P(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} s(\lambda) \cdot P(\lambda) d\lambda}, \quad (1)$$

где $s(\lambda)$ – спектральная чувствительность приемника излучения пирометра; λ_1 и λ_2 – ее верхняя и нижняя границы; $\epsilon(\lambda)$ – спектральная излучательная способность измеряемого объекта; $P(\lambda)$ – функция Планка.

Очевидно, без знания $\epsilon(\lambda)$ определение ϵ_r в соответствии с выражением (1) невозможно, и необходимые для измерений значения ϵ_r пользователи вынуждены брать из различной справочной

литературы. Число источников подобной информации очень велико, что само по себе уже создает проблемы. Но еще большей проблемой является частая противоречивость данных в этих источниках, что является следствием того, что они определялись для пирометров с различными $s(\lambda)$, для различных температур и для объектов с различающимися $\epsilon(\lambda)$. Такая неопределенность ненормальна с точки зрения современной метрологии.

Появление специализированных СИ, предназначенных для измерения излучательной способности, позволит качественно изменить ситуацию в пирометрии. Пользователи получат возможность с приписанной данному СИ погрешностью получать достоверную информацию об излучательной способности именно тех объектов, измерение температуры которых им предстоит выполнить. Располагая измеренной зависимостью спектральной излучательной способности $\epsilon(\lambda)$, они смогут принимать более осмысленные решения по выбору типа приобретаемого пирометра. Они смогут легко находить ϵ_r , соответствующие именно их объектам и именно для их условий. Для них также перестанет быть загадкой, почему при измерении температуры одного и того же объекта разными энергетическими пирометрами в одном случае необходимо использовать одно значение коэффициента коррекции по излучательной способности, а в другом – другое, отличающееся от первого на 5...10 % и более. Они смогут использовать при измерениях обоснованные значения коэффициента коррекции по излучательной способности, а не выбранные почти что интуитивно из огромного многообразия доступных источников. В конечном счете, это сформирует осознанное понимание необходимости не только производить измерения в строгом соответствии с разработанными и утвержденными методиками измерений, но и правильно составлять и грамотно корректировать эти методики. Если к первому так или иначе метрологи и технологи постепенно привыкают благодаря сертификации по ISO 9000, то со вторым дело обстоит гораздо сложнее – нет ни понимания необходимости, ни необходимых знаний и информации.

К тому же появление парка специализированных СИ для измерения спектральной излучательной способности позволит резко увеличить скорость накопления информации об этой крайне плохо изученной характеристике физических тел.

Увеличение экспериментальных данных об этой характеристике неизбежно вызовет возврат интереса исследователей к ней, приведет к появлению новых теоретических и математических моделей, описывающих ее, и как следствие, расширит наши знания о ней.

Необходимо отметить, что для вычисления ϵ_t согласно выражению (1) помимо $\epsilon(\lambda)$ необходимо располагать еще и зависимостью $s(\lambda)$. В настоящее время эта информация недоступна потребителю в полном объеме. В то же время трудно представить, что она является «закрытой» информацией и что при необходимости ее нельзя будет получить у производителя пирометров. Отсутствие сегодня этой информации на сайтах производителей можно объяснить лишь тем, что в полном объеме она еще не востребована потребителями. Как только возникнет потребность в полной информации об $s(\lambda)$ для конкретных пирометров, эта информация тут же появится на сайтах производителей, ибо ее отсутствие будет снижать конкурентоспособность приборов. Также можно предположить, что появятся простые и легальные программные средства, которые сделают расчеты в соответствии с выражением (1) доступными для любого специалиста-метролога или технолога.

Примеры реализации специализированных СИ спектральной излучательной способности $\epsilon(\lambda)$ приведены в патенте РФ [3] и в статье [4].

О необходимости эталона излучательной способности

Если ставится вопрос о необходимости создания того или иного СИ, то для него, в соответствии с положениями метрологии, необходимы соответствующая эталонная база и поверочные схемы. Речь идет, как минимум, о первичном эталоне излучательной способности, хранящем, воспроизводящем и передающем единицу излучательной способности, а также об оборудовании, позволяющем передавать эту единицу эталонным средствам более низкого ранга. Должна быть разработана и обоснована связь этого эталона с эталонами других физических величин, которая определит неопределенность в воспроизведении эталоном единицы излучательной способности.

Должны быть разработаны поверочные схемы, определяющие границы допустимых погрешностей для эталонных и рабочих СИ, методы и средства поверки.

В настоящий момент очевидно, что упомянутый эталон должен хранить, воспроизводить и передавать монохроматическую излучательную способность, интегральную излучательную способность и спектральную излучательную способность.

О необходимости первичного эталона излучательной способности для восстановления прослеживаемости пирометров к первичному эталону единицы температуры

Как известно, если объект с излучательной способностью ϵ измеряется энергетическим пирометром, то вследствие того, что его излучательная способность меньше 1, результат измерения оказывается заниженным.

Для снижения погрешности результатов измерений энергетическими пирометрами в них тем или иным способом вводят корректирующий коэффициент, связанный с ϵ объекта. При этом сама коррекция может осуществляться различными способами, например с использованием описанных в [5] известных соотношений

$$T_\delta = \left(\frac{1}{T_u} - \frac{\lambda}{c_2} \ln \epsilon_\lambda(\lambda, T) \right)^{-1} \quad (2)$$

или

$$T_\delta = T_u / \sqrt[4]{\epsilon_p}, \quad (3)$$

где T_δ – действительная температура измеряемого объекта; T_u – результат измерения, полученный с использованием пирометра. При этом действительная температура в соответствии с выражением (2) определяется тем точнее, чем уже диапазон спектральной чувствительности приемника и чем точнее известно значение квазимонохроматической излучательной способности $\epsilon_\lambda(\lambda, T)$, а в соответствии с выражением (3) – тем точнее, чем шире диапазон спектральной чувствительности приемника и чем точнее известно значение интегральной излучательной способности ϵ_p .

Производители пирометров, как отечественных, так и импортных, не раскрывают, каким образом они осуществляют упомянутую коррекцию – в соответствии с выражением (2), или (3), или как-то иначе. При этом потребитель не застрахован от того, что производителем в алгоритме коррекции допущены ошибки – например, выражение (2) использовано для коррекции по ϵ пирометра частичного или полного излучения или выражение (3) – для коррекции яркостного пирометра.

Также при коррекции может быть не учтена ширина спектрального диапазона прибора или то, что T_0 и T_u – в кельвинах, а не в градусах Цельсия. В этих случаях ошибки при коррекции высоких температур могут составлять всего 1...2 % и быть не замеченными производителем.

Отсутствие информации об алгоритме и аппаратной реализации метода коррекции имеет следующие последствия. Когда пользователь измеряет энергетическим пирометром температуру объекта, значение ϵ он может получить одним из двух способов. Первый заключается в использовании значения ϵ из справочных материалов. Однако этот способ имеет ограниченную применимость вследствие того, что в табличных данных обычно отсутствуют условия получения значения – спектральный диапазон, температура объекта и т. д. Поэтому чаще всего пользователь непосредственно определяет ϵ . Для этого он подбирает такое значение ϵ , чтобы скорректированный результат измерения пирометром был равен результату измерения температуры этого же объекта при помощи термопары или термосопротивления.

Однако из того, что он подобрал такое ϵ , при котором при данной температуре показания термопары и пирометра близки или совпадают, вовсе не следует, что при использовании подобранного ϵ результат измерения пирометром этого же объекта при другой температуре также будет правильным. Причина – в возможных ошибках в алгоритме коррекции. А поскольку эталон излучательной способности отсутствует, проверку корректности алгоритма не осуществляют ни производитель, ни контролирующие органы, ни потребитель.

В качестве пояснения сказанного может быть приведен следующий пример. Пусть мы имеем объект, температура которого 1600 К, и для измерения его температуры мы используем яркостный пирометр, работающий на длине волны 0,6 мкм. Пусть также на длине волны 0,6 мкм ϵ_λ равно 0,451 (в качестве примера выбран реальный вольфрам). Предположим, что разработчик ошибочно использовал для коррекции этого пирометра по ϵ не выражение (2), а выражение (3). Как следует из выражения (2), без коррекции результат измерения был бы равен 1519 К. Чтобы скорректировать его согласно выражению (3), необходимо использовать $\epsilon_p = 0,813$. То есть, если бы пользователь контактным способом определил действительное значение температуры объекта и стал подбирать такое ϵ_p в пирометре, при котором результат его измерения был бы равен 1600 К, он нашел бы, что $\epsilon_p = 0,813$.

Далее, пусть температура объекта изменилась и стала равна 2000 К. Как следует из выражения (2), без коррекции результат измерения был бы равен 1875 К. Корректируя его согласно выражению (3) найденным значением $\epsilon_p = 0,813$, как нетрудно убедиться, получаем в результате 1975 К. Таким образом, использование коррекции яркостного пирометра согласно выражению (3) [в то время как нужно корректировать согласно выражению (2)] привело к появлению дополнительной погрешности, равной в данном случае 1,25 %. Если учесть, что в настоящее время инструментальная погрешность очень многих пирометров значительно менее 1 %, то ошибка, связанная с использованием не того алгоритма, представляется значимой. А метрологических средств для ее выявления, как отмечалось, в настоящее время нет.

Второй аспект заключается в том, что *ввиду отсутствия первичного эталона излучательной способности нарушается прослеживаемость энергетических пирометров к первичному эталону единицы температуры*. Прослеживаемость у таких пирометров имеется только для случая измерения температуры АЧТ, так как именно на АЧТ они калибруются и поверяются, а АЧТ в составе эталонных установок различного ранга прослеживаемы к первичному эталону. Но излучательная способность АЧТ – 0,99 и выше, в то время как у реальных объектов в подавляющем большинстве случаев она ниже 0,94...0,95, доходя до 0,03...0,02 в случае объектов из алюминия и ряда его сплавов. Неоднозначность алгоритмов коррекции по ϵ не позволяет говорить о том, что скорректированные значения при $\epsilon \neq 1$ будут при поверке характеризоваться теми же или сопоставимыми погрешностями, что и при $\epsilon = 1$. *Данные погрешности при отсутствии информации об алгоритме коррекции связать друг с другом вообще невозможно*, приведенный выше пример подтверждает это. А никаких проверок на излучателях, прослеживаемых к первичному эталону и характеризующихся значениями ϵ , типичными для реальных объектов, не производится (вследствие отсутствия соответствующей эталонной базы), что и позволяет говорить об отсутствии прослеживаемости у энергетических пирометров к первичному эталону единицы температуры.

Классические пирометры спектрального отношения такой прослеживаемостью обладают. Но в последнее время производители стали снабжать некоторые модели своих пирометров спектрального отношения органами коррекции в виде циф-

ровых или аналоговых регуляторов, изменяющих измеренное отношение сигналов с выходов приемников в диапазоне от $+1,5...2$ до $-1,5...2$. Очевидно, что при измерении температуры «несерых тел», когда оператор «подстраивает» показания пирометра под правильный результат, делая коэффициент коррекции отличным от 0, этот пирометр теряет указанную прослеживаемость на тех же основаниях, что и энергетические пирометры.

Необходимо отметить, что количество пирометров спектрального отношения, снабженных подобными органами регулировки, непрерывно растет, поскольку их ведущие производители до сих пор не сумели найти иного способа коррекции методической погрешности, возникающей при измерении температуры «несерых» объектов. Это плохая тенденция, идущая вразрез с развитием современной метрологии. Коррекцию правильнее осуществлять аналогично [6], [7], чтобы не нарушить упомянутую прослеживаемость пирометра спектрального отношения к первичному эталону.

Восстановление прослеживаемости пирометров к Первичному эталону единицы температуры

Таким образом, энергетические пирометры, обычно калиброванные по «черным телам», нужно поверять не только по излучателям с $\epsilon = 0,99...0,999$, но и по излучателям с ϵ от $0,02...0,03$ до $0,98...0,99$. Говорить о прослеживаемости энергетических пирометров к первичному эталону единицы температуры можно будет лишь тогда, когда они при поверке будут укладываться в заявленную погрешность не только при измерениях на излучателе с $\epsilon = 0,99...0,999$, но и при измерениях на излучателе с несколькими другими значениями ϵ из диапазона от $0,02...0,03$ до $0,98...0,99$.

Очевидно, для этого необходим первичный эталон монохроматической и интегральной излучательной способности с соответствующей поверочной схемой, о котором говорилось выше.

Далее, как показано в статье [4], при измерении пирометрами спектрального отношения температуры «несерых тел» у пирометров возникает систематическая методическая погрешность. Коррекция этой погрешности может быть осуществлена согласно алгоритму, описанному в статьях [6], [7]. При этом для определения спектральной излучательной способности, в том числе и в цеховых условиях, необходимы специализированные средства измерений спектральной излу-

чательной способности $\epsilon(\lambda)$. Эти средства измерений должны калиброваться и поверяться в самостоятельной поверочной схеме, во главе которой должен находиться первичный эталон спектральной излучательной способности. Предлагаемые методы формирования спектральных зависимостей описаны в статье [7], в качестве светофильтров лучше использовать жидкостные светофильтры при стабилизированной температуре. В набор в первом приближении должны входить три фильтра, характеризующиеся снижением спектральной излучательной способности, повышением излучательной способности, а также вначале снижением, а затем повышением излучательной способности с ростом длины волны. Точные формы кривых зависимости ϵ от λ , формируемых эталоном, и метод их реализации международному сообществу еще предстоит обсудить и утвердить.

И далее, пирометры спектрального отношения, в которых тем или иным способом осуществляется коррекция для «несерых тел», должны поверяться на эталоне спектральной излучательной способности. По результатам этих поверок может быть определена метрологически значимая погрешность их измерения температуры «несерых тел» с учетом коррекции по спектральной излучательной способности, что снимает вопрос о непрослеживаемости таких пирометров к первичному эталону единицы температуры.

Список литературы:

1. Излучательные свойства твердых материалов / Под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. 471 с.
2. Vorthing A.G. // Phys. Rev. 1917. Vol. 10. P. 377.
3. Фрунзе А.В. Устройство для определения спектральной излучательной способности нагретых объектов / Патент РФ № 2403539. Заявл. 23.06.2009.
4. Фрунзе А.В. Повышение точности измерений широкополосными пирометрами спектрального отношения температуры металлов // Приборы. 2010. № 12. С. 23-32.
5. Линеверг Ф. Измерение температур в технике. Справочник / Пер. с нем. – М.: Металлургия, 1980. 544 с.
6. Фрунзе А.В. Расчетный метод определения температуры спектрального отношения // Измерительная техника. 2010. № 6. С. 38-41.
7. Самойлов М.Л., Фрунзе А.В. Повышение точности измерений температуры «несерых тел» широкополосным пирометром спектрального отношения // Метрология. 2010. № 6. С. 23-31.

Александр Вилленович Фрунзе, директор,
ННТП «ТЕРМОКОНТ», г. Москва,
e-mail: alex.fru@mtu-net.ru