

Метрологические проблемы пирометрии: анализ и перспективы преодоления

А. Б. ИОНОВ

Омский государственный технический университет, Омск, Россия, e-mail: antionov@mail.ru

Рассмотрены существующие проблемы бесконтактных измерений температуры, связанные с отсутствием контроля над методической погрешностью на практике. Показана необходимость создания национальных рекомендаций, регламентирующих разработку методик. Предложено перспективное направление развития пирометрии, связанное с применением интеллектуальных средств измерений.

Ключевые слова: температура, пирометр, тепловое излучение, термография, интеллектуальные измерения.

The problems of noncontact temperature measurements connected with practical absence of methodical error control are considered. The necessity of creation of the national recommendations regulating the development of methods. The prospective trend of pyrometry development connected with the application of intelligent measuring instruments is suggested.

Key words: temperature, pyrometer, thermal radiation, thermography, intelligent measurements.

Методы бесконтактных измерений температуры (пирометрии) в настоящее время находят все большее применение в металлургии, стекольной и химической промышленности, энергетике, медицине и многих других областях [1, 2]. В ряде случаев эти методы являются единственно возможными. Качество решения практических задач при их помощи напрямую зависит от точности (достоверности) результатов пирометрических измерений, особенно при непрерывном управлении технологическими процессами [3].

В [2, 4, 5] подробно описаны характерные особенности бесконтактных температурных измерений, связанные со значительной неопределенностью их результатов из-за влияния большого числа мешающих факторов (характеристик объекта, внешних условий и др.). Для достоверного измерения температуры эти факторы следует учитывать, а возникающую под их влиянием методическую погрешность контролировать. Иногда на практике соответствующая потеря точности не так опасна, но проблема в целом заслуживает пристального внимания [1].

Для выполнения измерений с требуемой точностью основополагающее значение имеет разработка и применение адекватных методик [6], что особенно актуально в связи с

тем, что пирометрические измерения являются косвенными. К сожалению, в РФ отсутствуют законодательно установленные конкретные регламентирующие метрологические критерии для разработки и аттестации подобных методик. В практической пирометрии это приводит к следующим основным проблемам:

широкое необоснованное применение упрощенных методик, в которых внешние факторы не учитываются, а погрешность измерений при оценке фактически принимается равной инструментальной;

при вовлечении в процесс измерений априорной информации с целью корректировки показаний пирометра (например, задание коэффициента излучения поверхности объекта) не анализируется адекватность процедуры коррекции и исходных данных.

Таким образом, достоверность результатов пирометрических измерений, а следовательно, и актуальность принимаемых на их основе решений зачастую оказываются под вопросом. Целью статьи является исследование существующих метрологических проблем в пирометрии для привлечения внимания к необходимости принятия мер по повышению качества бесконтактных температурных измерений, а также усилению контроля над ним.

Физические основы пирометрии. Как известно [2, 4], ключевой идеей пирометрии является использование вторичного процесса — электромагнитного (теплого) излучения, по физическим законам тесно связанного с температурой своего источника. Для «идеального» объекта (абсолютно черного тела) данная зависимость подчиняется закону Планка [2], описывающему спектральную плотность теплового излучения. На практике при измерениях важную роль играет конфигурация пирометрической цепочки, которая служит для описания совокупности эффектов, происходящих с тепловым излучением до его регистрации чувствительным элементом прибора. Основными ее элементами являются: объект из-

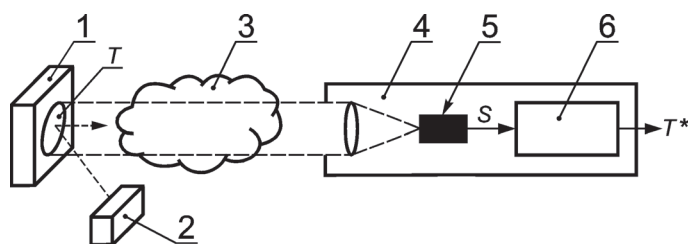


Рис. 1. Пирометрическая цепочка (T — температура поверхности объекта):

1 — объект; 2 — нагретое тело; 3 — среда пропускания; 4 — пирометр; 5 — приемник (S — его выходной сигнал); 6 — система обработки

мерений 1 (рис. 1), окружающие тела 2, среда распространения (атмосфера) 3, оптическая часть пирометра 4—6. Таким образом, в общем случае, характеристики регистрируемого пирометром излучения оказываются искаженными.

Основные факторы, влияющие на точность пирометрических измерений [4, 5]: состояние поверхности объекта (неизвестный коэффициент излучения); градиент температуры в поле зрения прибора; отраженное излучение соседних тел; поглощение излучения атмосферными газами; рассеяние на аэрозолях; собственное излучение атмосферы. Влияние большинства указанных факторов зависит от многих физических величин (явлений) и не может быть представлено простыми моделями. Зачастую в промышленности ситуация осложняется изменчивостью факторов во времени и невозможностью принятия организационных мер по их устранению. Наличие подобных трудностей привело к формированию в классической пирометрии концепции «псевдотемператур» [4], согласно которой пирометр ориентируется на измерение некоторой условной величины — радиационной (яркостной) или цветовой температуры, совпадающей с истинной только в идеальных условиях. Такой подход, при котором вся ответственность за компенсацию внешних факторов фактически перекладывается на оператора, позволил сконцентрироваться на совершенствовании простых средств измерений. Существенный изъян указанной концепции очевиден: условная температура не является физической характеристикой объекта, само по себе ее измерение лишено практической значимости. Конечной целью пирометрии является оценка реальной температуры, поэтому процедура приведения к ней значения «псевдотемпературы» также должна быть включена в общую методику и удовлетворять всем метрологическим требованиям [6].

Радиационная пирометрия. Наиболее простым и распространенным методом бесконтактного измерения температуры (80—90 % общего числа применений) является радиационная (яркостная) пирометрия, предусматривающая суммарную регистрацию теплового излучения в широком интервале длин волн (пирометры полного и частичного излучения) [4, 7]. Модель измерений, используемая в радиационной пирометрии для получения оценки температуры T^* , как правило, имеет вид

$$S = K_e G'(T^*),$$

где S — сигнал на выходе приемника излучения; K_e — априори устанавливаемый оператором коэффициент; $G'(T)$ — калибровочная характеристика, соответствующая излучению абсолютно черного тела.

Несовершенство принятой модели измерений является одним из основных источников возникновения методической погрешности [6]. Представленная модель не позволяет учесть отличие формы спектра излучения реального объекта от идеального, а также его селективное искажение при распространении. Это подтверждается результатами моделирования (рис. 2), которые показывают, что при измерении на средних расстояниях методическая погрешность, вызванная поглощением излучения парами воды, доминирует над инструментальной. К настоящему времени разработаны методики для исследования степени влияния некоторых внешних факторов с целью их компенсации [8], но они применимы только в стационарных условиях.

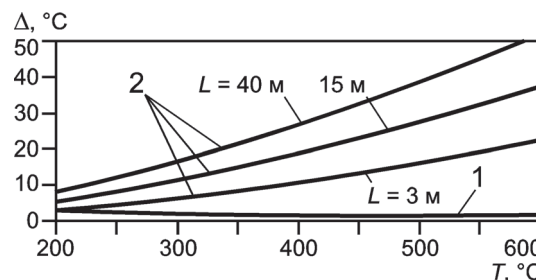


Рис. 2. Сравнение инструментальной 1 и методической 2 погрешностей пирометра частичного излучения, вызванных поглощением излучения водяным паром концентрацией 25 г/м³ (L — длина оптического пути)

Для обеспечения эффективности измерений предел погрешности должен быть известен (предварительно оценен) [3]. Поскольку пирометрические измерения являются косвенными, оценивать погрешности следует в соответствии с [9]. В таком случае определяющую роль играет зависимость между пределом нормируемой погрешности (включая методическую) и установленными границами допустимого изменения условий измерений (внешних факторов). На практике основным препятствием к подобному нормированию является организационная и техническая сложность мероприятий по оценке, прогнозированию и контролю внешних условий.

Существующие методические рекомендации [10] по проведению бесконтактных температурных измерений различного назначения затрагивают данную проблему, но конкретных требований (численных критериев) к внешним условиям не устанавливают. Таким образом, эффективность этих измерений фактически неконтролируема. К дополнительному несовершенству модели измерений приводит использование недостоверной априорной информации.

На рис. 3 показан рост методической погрешности при некорректном установлении коэффициента излучения K_e по отношению к объекту типа «графитовый стержень». Так как на данный момент конкретных требований к адекватности исходной информации не предъявляется, это усложняет проблему достоверной оценки погрешности пирометрических методик.

Особого внимания заслуживает тот факт, что типичный радиационный пирометр использует измерительную модель, особенности которой оператору неизвестны. Поэтому дополнительная корректировка показаний на выходе прибора (как и теоретическая оценка погрешности) весьма затруднительна.

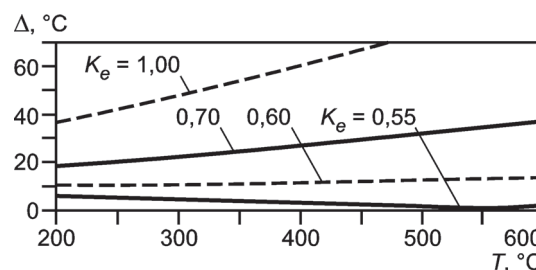


Рис. 3. Погрешность, вызванная неоптимальным выбором значения интегрального коэффициента K_e коррекции (излучения) в радиационной пирометрии для объекта типа «графитовый стержень»

Таким образом, недостаточный уровень проработки соответствующих метрологических вопросов, касающихся радиационной пирометрии, может привести к значительной недооценке (занижению) ожидаемой погрешности результата бесконтактных температурных измерений. Из-за несовершенства измерительной модели применение подобных пирометров оптимально только для решения относительно небольшого круга практических задач.

Альтернативные методы бесконтактных температурных измерений. Описанные выше трудности уже достаточно давно стали предметом изучения исследователей и научных работников в области пирометрии [2, 11]. В основу большинства предлагаемых альтернативных методов положен принцип повышения информативности входных данных за счет увеличения количества спектральных каналов регистрации излучения [11]. Преследуемая цель заключается в расширении допустимых условий применения пирометров без использования априорной информации, вводимой оператором.

Для измерений высоких температур в металлургии (выше 1000 °С) широкое распространение получили пирометры спектрального отношения, использующие два (и более) узкополосных канала регистрации излучения [2, 4]. Подобные методы, как правило, ориентированы на компенсацию коэффициента излучения [12]. Увеличение количества используемых каналов ведет к усложнению принятой измерительной модели, алгоритма работы пирометра и, потенциально, к более широкому кругу допустимых внешних условий. Существует достаточное количество решений как для высоких [12], так и для относительно низких температур [13]. Интенсивно развивается направление спектральной пирометрии [5, 11, 14], отличающееся максимальной информативностью входного сигнала.

По сравнению с радиационными пирометрами альтернативные средства бесконтактных температурных измерений являются более сложными и дорогими приборами. С точки зрения точности, они проигрывают классическим пирометрам в условиях, близких к лабораторным, а также при сильном влиянии факторов, не учтенных в модели измерений. Следует отметить, что в противовес бурному развитию методов и средств пирометрических измерений нормативное и метрологическое обеспечение данной области остается крайне незначительным. В частности, это касается установленной стандартами [7] номенклатуры показателей назначения, которая не позволяет качественно провести сравнение разнотипных пирометров. Также на ее основе невозможно оценить ожидаемую эффективность измерений (методическую погрешность) в реальных условиях, что необходимо для выбора подходящего пирометра при разработке методики. Одним из возможных вариантов решения проблемы является введение в номенклатуру основных метрологических характеристик пирометров нормируемых значений методических погрешностей для некоторого стандартизованного ряда разнотипных условий измерений, заранее регламентированных на национальном (международном) уровне.

Перспективы интеллектуализации пирометров. В реальных условиях точность результата измерений значения температуры зависит от комбинации нестационарных факторов (как внешних, так и внутренних) и поэтому не является постоянной [15]. Нормирование погрешности (для всей совокупности допустимых условий) — классический, но в большинстве случаев недостаточно эффективный прием. С одной стороны, в типичных условиях эксплуатации методическая погрешность, как правило, оказывается значительно ниже предельно допустимой, а с другой — если при возникновении внештатной ситуации она достигнет критического уровня, то оператор может узнать об этом только по косвенным признакам. Таким образом, перспективным направлением развития пирометрии является внутреннее оценивание качества измерений температуры самим прибором [5, 14].

Согласно стандарту [16] под интеллектуальным средством измерений понимается адаптивный датчик (либо система) с функцией метрологического самоконтроля, что, в числе прочего, подразумевает анализ методической погрешности и присвоение результату измерений определенного качественного статуса. Интерес к интеллектуальным датчикам постоянно повышается, в частности, это обусловлено проблемой прослеживаемости измерений [17]. В [18] приведены примеры построения подобных измерительных средств различного назначения, целью внедрения которых является повышение достоверности результата и увеличение межповерочного интервала датчиков.

С точки зрения пирометрии, особый интерес представляют способы метрологического диагностического самоконтроля, ориентированного на оценку и анализ критической (склонной к быстрому росту) составляющей погрешности [19]. Данная функциональность может быть обеспечена вследствие структурной и временной избыточности [16—19]: увеличения количества спектральных каналов и использования предположения о достаточно медленном изменении ряда внешних факторов (влажности, запыленности и пр.).

Как было показано ранее, при бесконтактных температурных измерениях критической составляющей является методическая погрешность, возникающая из-за неидеальности используемой модели. В контроле ее адекватности текущим условиям измерений должна заключаться одна из основных функций интеллектуального пирометра, реализуемая с учетом сведений о законе Планка и знаний о физических ограничениях на значения ряда параметров, характеризующих внешние факторы.

При разработке интеллектуальных пирометров целесообразно ориентироваться на исследования, связанные с неопределенностью бесконтактных температурных измерений. Введенное в обращение понятие «неопределенность измерений», как и рекомендуемый порядок ее выражения [20], хорошо вписываются в предлагаемую концепцию. Фактически неопределенность, определяемая по типу В с использованием априорных сведений, представляет собой искомую оценку достоверности полученного значения тем-

пературы. На основе ее анализа (сравнения с пороговым уровнем) результату измерений может быть присвоен определенный качественный статус.

В настоящее время работы в данном направлении находятся на начальной стадии, при этом исследования касаются пока только радиационной пирометрии [15, 21]. В частности, в [21] составлены бюджеты неопределенностей для процесса калибровки. В [15] показано, что с использованием подобных методик можно качественно оценить ожидаемую погрешность измерения путем моделирования на этапе выбора пирометра (тепловизора). Итак, целесообразность разработки интеллектуальных пирометрических средств измерений обуславливается ожидаемой практической выгодой их использования в производственных (и прочих сложных) условиях. Тем не менее, для качественной реализации необходимо решить ряд научно-исследовательских вопросов, к которым относятся: разработка адекватных моделей влияния реальных внешних факторов, совершенствование принципов ввода априорной информации оператором и т. д.

Таким образом, проведенное исследование показывает, что центральная проблема пирометрии заключается в существенной сложности достоверной оценки погрешности измерения пользователем. На практике из-за отсутствия необходимых регламентирующих документов качество оценивания истинной температуры, как и адекватность последующих принимаемых решений, целиком зависят от уровня квалификации оператора. С одной стороны, преодоление данной проблемы следует осуществлять путем разработки национальных рекомендаций по составлению, выбору и применению на практике методик бесконтактных температурных измерений, в которых особое внимание уделять контролю методической погрешности. Кроме того, целесообразно расширять номенклатуру основных метрологических характеристик пирометров и тепловизоров, обеспечив возможность выбора средства измерений для работы в конкретных условиях. С другой стороны, перспективным направлением является разработка интеллектуальных пирометров, ориентированных на внутренний контроль достоверности результатов измерений путем собственной оценки их погрешности (неопределенности).

Л и т е р а т у р а

1. **Вавилов В. П.** Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: Издат. дом Спектр, 2009.
2. **DeWitt D.P., Nutter G.D.** Theory and Practice of Radiation Thermometry. N.Y.: Wiley Interscience, 1988.
3. **МИ 2233—2000.** ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Общие положения.

4. **Герашенко О. А. и др.** Температурные измерения: Справочник. Киев: Наукова думка, 1989.

5. **Ионов Б. П., Ионов А. Б.** Спектрально-статистический подход к бесконтактному измерению температуры // Датчики и системы. 2009. № 2. С. 9—12.

6. **ГОСТ 8.563—2009.** ГСИ. Методики (методы) измерений.

7. **IEC/TS 62492—1.** Industrial process control devices — radiation thermometers Pt. 1. Technical data for radiation thermometers. Geneva (Switzerland), 2008.

8. **ASTM E1933-99a:2010.** Standard test methods for measuring and compensating for emissivity using infrared imaging radiometers.

9. **МИ 2083—90.** ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.

10. **РД 153-34.0-20.364-00.** Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования. М.: Изд-во ОРГРЭС, 2000.

11. **Магунов А. Н.** Спектральная пирометрия // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 5—28.

12. **Pat. WO 03/087885.** Apparatus and method for true temperature estimation 23.10.2003.

13. **Boboridis K., Obst, A. W.** A High-Speed Four-Channel Infrared Pyrometer // Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry: Proc. AIP Conf. Melville (USA) 2003. V. VII. P. 759—764.

14. **Ионов А. Б. и др.** Разработка алгоритма оценки температуры объекта в спектральной пирометрии // Ползуновский вестник. 2011. № 3/1. С. 34—37.

15. **Minkina W., Dudzik S.** Infrared Thermography. Errors and Uncertainties. N.Y.: John Wiley & Sons, 2009.

16. **ГОСТ Р 8.673—2009.** ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Основные термины и определения.

17. **Taymanov R., Sapozhnikova K.** Metrological Self-Check and Evolution of Metrology // Measurement. 2010. № 43. P. 869—877.

18. **Taymanov R., Sapozhnikova K., Druzhinin I.** Sensor Devices with Metrological Self-Check // Sensors & Transducers. 2011. V. 10. P. 30—45.

19. **ГОСТ Р 8.734—2011.** ГСИ. Датчики интеллектуальные и системы измерительные интеллектуальные. Методы метрологического самоконтроля.

20. **ISO/IEC Guide 98-3:2008.** Uncertainty of measurement. Pt. 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). Geneva (Switzerland), 2008.

21. **Fischer J. e. a.** CCT-WG5 on Radiation Thermometry. Uncertainty Budgets for Calibration of Radiation Thermometers below the Silver Point. Sèvres (France) IBWM, 2008.

Дата принятия 04.04.2013 г.