

Современные методы многоцветовой термометрии металлургических объектов

В условиях случайно изменяющейся излучательной способности и пропускания промежуточной среды металлургических объектов многоцветовая пирометрия не имеет альтернативы. Для систематизации, а также определения направления развития известных решений и места разрабатываемых ФТИМС НАН Украины новых методов и средств пирометрии излучения в системе многоцветовых термометрических технологий выполнена их классификация. По принципам измерений многоцветовые методы разделены на 2 группы и 43 подгруппы.

Ключевые слова: многоцветовая пирометрия излучения, металлургия, излучательная способность, первичная пирометрическая информация (ППИ), алгоритмы обработки ППИ, многоцветовые температуры излучения

Термометрия доминирует и составляет около 30 % в структуре метрологического обеспечения металлургических предприятий [1]. Доминирующие позиции объясняются тем, что большинство технологических процессов в металлургии основано на температурном воздействии на основные и вспомогательные материалы. Измерения температуры по тепловому излучению термометрируемых объектов не имеет альтернативы для непрерывного термоконтроля высокотемпературных металлургических процессов.

Теория теплового излучения была разработана к концу 20-х годов прошлого столетия. Завершающим этапом этой теории стало знаменитое уравнение Шредингера. Практическое применение теории нашла в термометрии (энергетической и спектральной отношения). Поэтому оптические термометры появились в процессе разработки теории. Метод визуальной пирометрии был реализован в 80-е годы 19 века в России и Франции [2]. Первые пирометры сразу же нашли применение на практике и прежде всего в металлургии.

На базе классической пирометрии излучения ФТИМС НАН Украины разработал технологии световодного и бесконтактного непрерывного термоконтроля металлургических процессов и оборудования. В этих разработках особое внимание уделялось методам и вспомогательным устройствам формирования теплового излучения со стабильными термометрическими параметрами [3]. Практическое использование показало высокую технико-экономическую эффективность созданных технологий термоконтроля в условиях стабильной излучательной способности и пропускания сопутствующей промежуточной среды термометрируемых объектов. В наиболее характерных для металлургии условиях случайно изменяющихся оптических характеристик термометрируемых объектов наиболее эффективной является многоцветовая пирометрия излучения, которая повышает метрологические характеристики наиболее эффективного непрерывного термоконтроля и расширяет область его применения. Зна-

чительный вклад в лидирующие позиции Украины в области многоцветовой оптической термометрии вносят разработки ФТИМС НАН Украины [1]. Современное состояние и бурное развитие оптических и электронных технологий, в том числе оптоэлектронных, волоконно-оптических, микропроцессорных и компьютерных обеспечивает интенсивное развитие многоцветовой пирометрии излучения. Наиболее значимые результаты в области многоцветовой пирометрии получены в Украине, России, Беларуси, Японии, Германии и США.

В настоящее время, несмотря на актуальность и значительное количество работ, отсутствует систематизация и подробная классификация методов многоцветовой пирометрии излучения, что затрудняет анализ состояния и определение направлений её развития. Выполненная в отделе термометрии и физико-химических исследований ФТИМС НАН Украины классификация по принципам измерений температуры представлена на рисунке. На основе термодинамических законов теплового излучения и пирометрических уравнений доказано, что предложенные ранее для исключения методических погрешностей многоцветовой пирометрии сложные математические преобразования в итоге сводятся к решению несформулированных прежде двух задач [4]:

– определению таких значений длин волн, при которых эквивалентная излучательная способность термометрируемого объекта равна единице и, следовательно, измеряемая температура излучения равна его температуре излучения (1.1.) или получаемая в виде значений температур излучения первичная пирометрическая информация (ППИ) обеспечивает определение искомой температуры по математическим моделям и сравнением (1.2.);

– созданию условий получения и обработки первичной пирометрической информации для спектральных распределений излучательной способности термометрируемых объектов, при которых исходная первичная пирометрическая информация достаточна для измерения (2.1.) или расчёта искомой температуры по соответствующим

адаптируемым (2.2.) и априорно заданным (2.3.) алгоритмам и математическим моделям.

Принципы классифицируемых методов первой группы основаны на:

– выборе таких значений настроечных длин волн, при которых эквивалентная излучательная способность равна единице и, соответственно, измеряемые многоцветовые температуры излучения термометрируемого объекта равны его искомой температуре (1.1.) [5, 6];

– том, что для любых реальных сплошных спектральных распределений излучательной способности существует такой набор длин рабочих волн, при котором $\varepsilon_3 = 1$, то есть измеренная многоцветовая температура излучения объекта равна его температуре (1.1.1.), где ε_3 – эквивалентная излучательная способность объекта. Например, для трёхцветовой температуры излучения $\varepsilon_3 = \varepsilon_1 \varepsilon_3 / \varepsilon_2^2$; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – излучательные способности объекта на длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, соответственно [5];

– априорной зависимости оптимального значения длины настроечной волны ($\lambda_{но}$) от разности измеряемых трёхцветовых и характеристических температур излучения термометрируемого объекта. При $\lambda_2 = \lambda_{но}$ эквивалентная излучательная способность термометрируемого объекта равна единице и поэтому $S_{3ц} = T$. Характеристической температурой S_x для трёхцветовой температуры излучения является двухцветовая температура, измеренная на граничных волнах (1.1.2.) [6];

– обработке, получаемой в виде значений измеряемых температур излучения, первичной пирометрической информации (ППИ) по математическим моделям, номограммам и сравнением (1.2.) [7-11];

– установленных зависимостях температуры объекта от измеряемых на определённых длинах волн одно- и многоцветовых температур его излучения, обеспечивающих расчёт искомой температуры по заданным математическим моделям непосредственно через измеряемые многоцветовые температуры или замену излучательной способности на средних длинах волн её значениями на граничных волнах (1.2.1.) [7-9];

– том, что для используемых граничных длин волн существует такое значение промежуточной длины волны, на которой излучательная способность является априори заданной функцией излучательной способности на граничных длинах волн (1.2.1.1.) [7, 8];

– том, что для граничных длин волн λ_1 и λ_3 для монотонных спектральных распределений излучательной способности существует такое значение λ_2 , при котором $\varepsilon_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) / 2$ (1.2.1.1.1.) [7];

– том, что для граничных длин волн λ_1 и λ_3 для монотонных спектральных распределений излучательной способности существует такое значение λ_2 ,

при котором $\varepsilon_2 = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_3}$. В отличие от (1.2.1.1.1.) за-

висимость $\varepsilon_2 = \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_3}$ обеспечивает аналитическое решение системы трёх исходных пирометрических уравнений (1.2.1.1.2.) [8];

– том, что при определённых, меньших и больших критического $\lambda_{кр}$, значениях длин сопряжённых настроечных волн соответствующие им сопряжённые

трёхцветовые и более высоких порядков температуры излучения эквидистантны относительно температуры термометрируемого объекта; сопряжёнными являются полученные на сопряжённых настроечных длинах волн трёхцветовые температуры излучения, отклонения которых от температуры объекта противоположны по знаку и равны по абсолютному значению. Критической называется такая длина волны $\lambda_{кр}$, при которой эквивалентная длина волны λ_3 стремится к бесконечности (1.2.1.2.) [9];

– априорных зависимостях поправки к измеряемым многоцветовым температурам $\Delta = S_{лиц} - T$ от длины настроечной волны; $\Delta = f(\lambda_{н})$, для различных температур контролируемого температурного диапазона; при этом $\lambda_{н}$ определяется по построенной для этих зависимостей номограмме (1.2.2.) [10];

– использовании минимума среднеквадратического отклонения для выбора из базы привязанных к температурам объекта кривых Планка, наиболее близких к спектральным кривым, полученным в результате измерений распределённых по спектру одноцветовых температур излучения термометрируемой поверхности (1.2.3.) [11].

Принципы классифицируемых методов второй группы основаны на:

– использовании покрытий и полостей с заданными спектральными распределениями излучательной способности или отражателей и облучателей для фонового насыщения собственного излучения термометрируемого объекта до требуемого, априори известного уровня (2.1.) [12-14];

– использовании покрытий из термо- и коррозионноустойчивых материалов с высокой тепло- и температуропроводностью и заданными спектральными распределениями излучательной способности (2.1.1.) [12];

– определении знака и значения температурного гистерезиса яркости по разности характеристических и трёхцветовых температур излучения, измеренных на близких к критическим настроечным волнам с последующим введением поправки. Таким образом исключается влияние температурного гистерезиса яркости излучающей полости стационарно установленных в футеровке печей иммерсионных прямых неизотермических световодов на результаты измерений (2.1.2.) [13];

– облучении термометрируемой поверхности с помощью зеркальных отражателей её собственного излучения или нагреваемых облучателей. В этих случаях собственное излучение поверхности дополняется (насыщается) отражаемой ею составляющей излучения отражателя или облучателя (2.1.3.) [14];

– получении и обработке ППИ по алгоритмам, адаптируемым к оптическим характеристикам, в том числе спектральным распределениям излучательной способности термометрируемых объектов (2.2.) [15-32];

– выборе значений температуры и коэффициентов функции спектрального распределения излучательной способности, при котором сумма квадратов разности между расчётными и измеренными значениями логарифма спектральной яркости или регистрируемых сигналов минимальна (2.2.1.) [15-19];

– том, что при так называемой оптимальной полихроматической яркостной температуре термометрируемого объекта $S_{ор}$, имеющей однозначную связь с его температурой T и равной такой температуре чёрного тела, при которой спектральные распределения яркости АЧТ и объекта на $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$ максимально приближаются друг к другу. Причём в качестве критерия приближения используется минимальное значение суммы квадратов разностей $\sum \left(\ln I_i + \frac{C_2}{\lambda_i S} \right)^2$ значений

логарифмов яркостей объекта и АЧТ на $\lambda_1, \lambda_2 \dots \lambda_n$ (2.2.1.1.) [15];

– том, что при так называемой оптимальной полихроматической цветовой температуре термометрируемого объекта $S_{оц}$, имеющей однозначную связь с его искомой температурой T и равной такой температуре чёрного тела, при которой спектральные распределения яркости АЧТ, умноженное на оптимальное подобранное значение ε и объекта на рабочих длинах волн максимально приближаются друг к другу. Причём минимизации подвергается функция

$$f = \sum \left(\ln I_i - a + \frac{C_2}{\lambda_i S} \right)^2, \text{ где } a \text{ – коэффициент линейной}$$

зависимости (2.2.1.2.) [16];

– том, что подвергаемая минимизации методом наименьших квадратов функция имеет вид

$$f = \sum \left(\ln I_i - a - b \lambda_i + \frac{C_2}{\lambda_i S} \right)^2, \text{ а оптимальная линейная}$$

температура $S_{оп}$ имеет однозначную связь с температурными поправками на методические и инструментальные погрешности в случае аппроксимации реальных спектральных распределений излучательной способности термометрируемых объектов линейными, где b – коэффициент линейной зависимости (2.2.1.3.) [17];

– том, что логарифм излучательной способности аппроксимируют экспоненциально-степенной зависимостью, а методом наименьших квадратов мини-

мизируют функцию $f = \sum \left(\ln I_i - a \lambda^\alpha + \frac{C_2}{\lambda_i S} \right)^2$ и аналогич-

но (2.2.1.1.-2.2.1.3.) находят $S_{оэс}$ и T , где α – показатель степени аппроксимации $\ln \varepsilon(\lambda)$ (2.2.1.4.) [18];

– том, что используя измерения коэффициентов отражения ρ можно исключить влияние излучательной способности на результаты термоконтроля; при этом представляет интерес возможность использования относительных значений коэффициента отражения для разных спектральных областей путём измерения интенсивности излучения, отражённого в зеркальном направлении; для поиска оптимальной рефлектометрической температуры $S_{ор}$ минимизиру-

ют функцию $f = \sum \left(\ln I_i + \frac{C_2}{\lambda_i S} - \ln(1-\rho_i) \right)^2$ (2.2.1.5.) [19];

– измерениях двух трёхцветовых или более высоких порядков температур излучения, одна из которых выше, а другая ниже искомой температуры объекта, с последующим определением темпера-

турных поправок к ним или фиксацией их равенства (2.2.2.) [20-23];

– априорно рассчитанной зависимости температурной поправки $\Delta = S_{3ц} - T$ от определяемой излучательными характеристиками термометрируемого объекта разности между измеряемой трёхцветовой температурой излучения и её характеристической температурой $\delta = S_{3ц} - S_x$. При этом температурная поправка вводится в значение характеристической температуры (2.2.2.1.) [19];

– зависимости коэффициента усреднения сопряжённых относительно температуры объекта значений многоцветовых температур излучения от их отклонений от характеристических температур (2.2.2.2.) [21];

– зависимости коэффициента асимметрии сопряжённых относительно температуры объекта значений многоцветовых температур излучения от их отклонений от характеристических температур (2.2.2.3.) [22];

– том, что при достижении, в процессе нагрева объекта в печи, равенства сопряжённых многоцветовых температур его излучения, эти температуры равны искомой температуре объекта, то есть, например, $S_{3ц1} = S_{3ц2} = T$ (2.2.2.4.) [23];

– использовании переносимой излучением информации о спектральном распределении излучательной способности термометрируемых объектов при симметричном расположении по спектру длин рабочих волн (2.2.3.) [24-27];

– том, что симметричное распределение рабочих длин волн λ_1, λ_2 и λ_3 обеспечивает априорную информацию об ε_2 через ε_1 и ε_3 в соответствии с выражением $\varepsilon_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/2$, для линейных распределений излучательной способности (2.2.3.1.) [24, 25];

– том, что симметричное распределение рабочих длин волн λ_1, λ_2 и λ_3 обеспечивает априорную информацию об ε_2 через ε_1 и ε_3 в соответствии с выражением $\varepsilon_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)/D$. Зная значения делителя D , можно определить ε_2 для любых распределений излучательной способности (2.2.3.2.) [26, 27];

– использовании дополнительных переменных и связей между ними в системах одно- и двухцветовых пирометрических уравнений, обеспечивающих их численные решения (2.2.4.) [28-32];

– использовании относительных приращений излучательной способности и соответствующих им относительных интервалов между рабочими длинами волн в системе двух уравнений для обратных значений, измеренных на $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ двухцветовых температур излучения, позволяющих решить эту систему численным методом относительно температуры объекта (2.2.4.1.) [28-31];

– решении исходной системы трёх пирометрических уравнений путём замены разностей логарифмов излучательной способности на $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ соответствующими разностями регистрируемой в процессе измерения яркости с последующим численным определением температуры объекта через используемый для расчётов показатель степени α (2.2.4.2.) [32];

– обработке ППИ по априорно заданным алгоритмам, независимым от оптических характеристик термометрируемых объектов, в том числе спектральных распределений их излучательной способности (2.3.) [33-41];

– использовании двух спектральных отношений яркости или двухцветовых температур, измеренных для трёх или четырёх участков спектра (2.3.1.) [33-38];

– том, что в пределах справедливости приближения Вина любая производная логарифма спектральной яркости по длине волны является монотонной функцией температуры абсолютно чёрного тела; заменяя производные конечно-разностными отношениями можно получить уравнения, связывающие температуры объекта и его излучения (2.3.1.1.) [33-36];

– том, что после логарифмирования двойного отношения возведённых в соответствующие степени регистрируемых потоков излучения, при определённом в процессе калибровки пирометрической системы требуемом значении η_3 достигается равенство $(1 - \eta_3) / (1 - \beta\eta_3) = \ln(\varepsilon_2/\varepsilon_1) / \ln(\varepsilon_4/\varepsilon_3)$; в этом случае результаты измерений равны температуре объекта, где $1 - \beta\eta_3$ и $1 - \eta_3$ степени отношений регистрируемого излучения на λ_1, λ_2 и λ_3, λ_4 ; $\beta = \lambda_{312} / \lambda_{334}$; $\lambda_{312} = \lambda_1 \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)$; $\lambda_{334} = \lambda_3 \lambda_4 / (\lambda_4 - \lambda_3)$, (2.3.1.2.) [37, 38];

– возможности расчёта температуры объекта по измеренным двум двухцветовым температурам излучения для линейных распределений по шкале длин волн его излучательной способности (2.3.2) [32, 39];

– том, что для линейных распределений излучательной способности на рабочих длинах волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, при условии $\lambda_3 - \lambda_2 = \lambda_2 - \lambda_1$, разность обратных значений двухцветовых температур излучения является функцией излучательных характеристик термометрируемого объекта и определяет температурную поправку для перехода от двухцветовых температур к температурам объекта (2.3.2.1.) [39];

– утверждении, что при использовании равноотстоящих по шкале частот спектральных каналов эквивалентные длины волн и, следовательно, инструментальные погрешности для двухцветовых температур излучения в соседних парах спектральных диапазонов одинаковы; выполнение этого условия, $\nu_1 - \nu_2 = \nu_2 - \nu_3$, даёт возможность рассчитывать температуру объекта по первичной пирометрической информации, полученной в трёх равноотстоящих спектральных каналах (2.3.2.2.) [32];

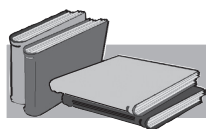
– получении системы n пирометрических уравнений с n неизвестными (2.3.3.) [40, 41];

– решении системы n пирометрических уравнений с $n + 1$ неизвестным ($T, \varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots \varepsilon_n$) путём описания спектрального распределения излучательной способности термометрируемого объекта $\varepsilon = f(\lambda)$ полиномом и уменьшения, за счёт этого, количества неизвестных до n (2.3.3.1.) [40];

– установленной зависимости интегральной излучательной способности в общем спектральном диапазоне от излучательных способностей размещённых в нём определённым образом спектральных поддиапазонов, позволяющей путём соответствующей замены получить n неизвестных в решаемой системе n пирометрических уравнений (2.3.3.2.) [41].

Для полной классификации необходимо выделить комбинационную группу методов, которые основаны на сочетании возможностей различных групп и подгрупп методов. Например, сочетание подгрупп (2.2.3.1.) и (2.1.1.) обеспечивает исключение методических погрешностей линейной симметрично-волновой пирометрии излучения при использовании покрытий с требуемыми для неё линейными распределениями спектральной излучательной способности.

Таким образом, в результате анализа установлено, что основные разработки в области многоцветовой пирометрии излучения выполнены в течение последних 10 лет. Современные достижения и миниатюризация оптоэлектронной, микропроцессорной техники, а также технологий цифровой обработки сигналов способствовали бурному развитию этого направления в оптической термометрии. Наиболее существенные результаты по этому направлению получены отечественными учёными, а также в России, Беларуси, Японии, Германии и США. Для систематизации и определения направления развития известных решений, а также места разрабатываемых ФТИМС НАН Украины методов и средств пирометрии излучения в системе многоцветовых термометрических технологий выполнена их классификация. По принципам измерений многоцветовые методы разделены на 2 группы и 43 подгруппы.



ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков Л. Ф. История, состояние и перспективы развития температурных измерений в металлургии / Л. Ф. Жуков, Д. А. Петренко, А. Л. Корниенко // Металл и литьё Украины. – 2012. – № 7. – С. – 27-34.
2. Крутиков В. Н. О прослеживаемости современных пирометров к первичному эталону единицы температуры и классификации методов пирометрии / В. Н. Крутиков, А. В. Фрунзе // Измерительная техника. – 2012. – № 2.
3. Жуков Л. Ф. Исследование и разработка методов и средств температурного контроля и ресурсосберегающих технологических процессов получения жидкого чугуна в литейном производстве: дис. д-ра техн. наук: 05.11.04, 05.16.04 / Л. Ф. Жуков. – К., 1992. – 505 с.
4. Жуков Л. Ф. Новые технологии многоцветовой симметрично-волновой термометрии и их метрологические характеристики / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко // Инженерно-физический журнал. – 2014. – № 2 (87). – С. 473-482.
5. Пат. 51076 А Украина, МПК G01J 5/60. Способ измерения температуры / Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № 2001129091; заявл. 27.12.01; опубл. 15.11.02, Бюл. №11.
6. Пат. 63734 А Украина, МПК G01J 5/00, G01N 23/00, G01K 11/00. Способ измерения температуры / Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № 2003065229; заявл. 06.06.03; опубл. 15.01.04, Бюл. № 1.

7. Пат. 73231 Украина, МПК G01J 5/00. Комбинированный способ трихроматической цветовой пирометрии / К. И. Луданов; заявитель и патентообладатель Луданов К. И. – № 2003076554; заявл. 14.07.03; опубл. 15.06.05, Бюл. № 6.
8. Пат. 82870 Украина, МПК G01J 5/00. Комбинированный способ трихроматической цветовой пирометрии / К. И. Луданов; заявитель и патентообладатель Луданов К. И. – № а201303825; заявл. 28.03.13; опубл. 27.08.13, Бюл. № 16.
9. Пат. 54756 А Украина, МПК G01J 5/00. Способ измерения температуры / Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № 2002032293; заявл. 22.03.02; опубл. 17.03.03, Бюл. № 3.
10. Жуков Л. Ф. Исследование и разработка методов многоцветовой оптической термометрии / Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан // Инженерно-физический журнал. – 2002. – № 5 (75). – С. 165-169.
11. Пат. 2366909 Российская Федерация, МПК G01J 5/60. Многоканальное устройство для измерения пирометрических характеристик / А. А. Аушев, А. Г. Бедрин, А. Н. Туркин; заявитель и патентообладатель ФГУП НИИКИ ОЭП. – № 2008115767/28; заявл. 21.04.08; опубл. 10.09.09, Бюл. № 25.
12. Пат. 4448547 А США, МПК G01J 5/00. Методика пирометрических измерений с использованием люминофоров / Вискершейм К. А.; заявитель и патентообладатель Корпорация Льюксторн. – № 06/176, 691; заявл. 10.07.80; опубл. 15.04.84.
13. Пат. 63755 У Украина, МПК G01J 5/00. Способ измерения температуры / Жуков Л. Ф., Богдан А. В.; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № u201101044; заявл. 31.01.11; опубл. 25.10.11, Бюл. № 20.
14. Gardner J. L. Multi-wavelength radiation pyrometry where reflectance is measured to estimate emissivity / J. L. Gardner, T. P. Jones // J. Phys. E: Sci. Instr. – 1980. – V. 13, 3. – P. 306-310.
15. Снопко В. Н. Методы оптимальной полихроматической пирометрии / В. Н. Снопко // Теплофизика высоких температур. – 1987. – Т. 25, 5. – С. 980-986.
16. Гада Я. М. Методы пирометрии по спектральному распределению интенсивности излучения нагретого тела / Я. М. Гада, В. Н. Снопко. – Минск: Ин-т физики АН БССР, 1981. – 56 с. – (Препринт / Ин-т физики АН БССР; – 238).
17. Гада Я. М. Измерение температуры по распределению интенсивности в спектре излучения нагретого тела / Я. М. Гада, В. Н. Снопко // Теплофизика высоких температур. – 1981. – Т. 19, 2. – С. 381-385.
18. Coates P. B. The least-squares approach to multi-wavelength pyrometry / P. B. Coates // Temperatures – High Pressures. – 1988. – V. 20, 4. – P. 433-442.
19. Гада Я. М. Экспериментальная проверка методики пирометрии, основанной на измерении собственного и отраженного излучения / Я. М. Гада, В. А. Длугунович, В. Н. Снопко // Ж. прикладной спектроскопии. – 1984. – Т. 40, 4. – С. 626-630.
20. Пат. 63396 А Украина, МПК G01J 5/00, G01K 11/00. Способ измерения температуры / Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № 2003043296; заявл. 14.04.03; опубл. 15.01.04, Бюл. № 1.
21. Пат. 65861 А Украина, МПК G01J 5/00, G01K 11/00. Способ измерения температуры / Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № 2003065464; заявл. 12.06.03; опубл. 15.04.04, Бюл. № 4.
22. Пат. 64517 А Украина, МПК G01J 5/60, G01J 5/00. Способ измерения температуры / Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № 2003065712; заявл. 20.06.03; опубл. 16.02.04, Бюл. № 2.
23. Пат. 71194 С2 Украина, МПК G01K 11/00, G01J 5/00. Способ измерения температуры объекта в нагревательной печи / Л. Ф. Жуков, А. В. Богдан; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № 2003119912; заявл. 04.11.03; опубл. 15.06.06, Бюл. № 6.
24. Пат. 76096 Украина, МПК G01J 5/00. Способ измерения температуры / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № u201206525; заявл. 29.05.12; опубл. 25.12.12, Бюл. № 24.
25. Пат. 82849 Украина, МПК G01J 5/00. Способ измерения температуры / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № u201302221; заявл. 22.02.13; опубл. 12.08.13, Бюл. № 15.
26. Пат. 86030 Украина, МПК G01J 5/00. Способ измерения температуры / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № u201307374; заявл. 11.06.13; опубл. 10.12.13, Бюл. № 23.
27. Пат. 87353 Украина, МПК G01J 5/00. Способ измерения температуры / Л. Ф. Жуков, А. Л. Корниенко; заявитель и патентообладатель ФТИМС НАН Украины. – № u201307161; заявл. 06.06.13; опубл. 10.02.14, Бюл. № 3.
28. Свет Д. Я. Независимое определение излучательной способности по спектру собственного теплового излучения / Д. Я. Свет // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 221, 1. – С. 81-83.
29. Свет Д. Я. Пирометрия по собственному излучению веществ с изменяющейся излучательной способностью. Объективные методы пирометрии излучения металлов / Д. Я. Свет. – М.: Наука, 1976. – С. 135-149.
30. Пат. 2255312 Российская Федерация, МПК G01J 5/60. Способ пирометрических измерений / Д. Я. Свет; заявитель и патентообладатель Свет Д. Я. – № 2003125295/28; заявл. 19.08.03; опубл. 27.02.05, Бюл. № 18.
31. Пат. 2365883 Российская Федерация, МПК G01J 5/60. Способ пирометрических измерений / Д. Я. Свет; заявитель и патентообладатель Д. Я. Свет – № 2007145705/28; заявл. 11.12.07; опубл. 27.08.09, Бюл. № 24.
32. Снопко В. Н. Основы методов пирометрии по спектру теплового излучения / В. Н. Снопко. – Минск: Ин-т физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, 1999. – 224 с.
33. Жагулло О. М. Метод пирометрии двойного спектрального отношения / О. М. Жагулло // Теплофизика высоких температур. – 1972. – Т. 10, 3. – С. 622-628.
34. Жагулло О. М. О возможности метода пирометрии двойного спектрального отношения / О. М. Жагулло // Тр. метрологических ин-тов СССР. – 1975. – Вып. 181(242). – С. 91-97.
35. Жагулло О. М. Возможность использования спектрального распределения энергии теплового излучения для измерения температуры / О. М. Жагулло // Там же. – 1972. – Вып. 131. – С. 72-79.
36. Жагулло О. М. Пирометр двойного спектрального отношения / О. М. Жагулло // Там же. – 1972. – Вып. 131. – С. 166-171.
37. Поскачей А. А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью / А. А. Поскачей, Л. А. Чарихов. – М.: Металлургия, 1978. – 200 с.
38. New Systems of True Temperature Radiation Pyrometry / D. Y. Svet, A. F. Parfinovich, O. R. Popova et al. // Symposium on Major Problems of Present-day Radiation Pyrometry, Moscow. – 1986. – P. 105-112.
39. Pyatt E. C. Some consideration of the errors of brightness and two-colour types of spectral radiation pyrometer / E. C. Pyatt // Brit. J. Appl. Phys. – 1954. – V. 5, 7. – P. 264-268.
40. Пат. 2141629 Российская Федерация, МПК G01J 5/60. Способ и устройство определения внутренней температуры в металлургических установках / В. Лисиенко, Б. Попов; заявитель и патентообладатель Сименс АГ (DE); НПВП ТО-РЕКС. – № 96119684/28; заявл. 27.09.96; опубл. 20.11.99, Бюл. № 22.

Анотація

Жуков Л. Ф., Корнієнко А. Л., Петренко Д. О.

Сучасні технології багатокольорової термометрії металургійних об'єктів

В умовах випромінювальної здатності, що випадково змінюється, та пропускання проміжного середовища металургійних об'єктів багатокольорова пірометрія не має альтернативи. Для систематизації, а також визначення напрямків розвитку відомих рішень і місця розроблюваних ФТІМС НАН України нових методів та засобів пірометрії випромінювання в системі багатокольорових термометричних технологій виконана їх класифікація. Відповідно до принципів вимірювань багатокольорові методи розподілено на 2 групи та 43 підгрупи.

Ключові слова

багатокольорова пірометрія випромінювання, металургія, випромінювальна здатність, первинна пірометрична інформація (ППІ), алгоритми обробки ППІ, багатокольорові температури випромінювання

Summary

Zhukov L., Kornienko A., Petrenko D.

Modern technologies of multiwavelength pyrometry for metallurgical objects

It is shown that in conditions of metallurgical objects' non-stable emissivity and transmissivity of environment multiwavelength pyrometry has no alternative. The purpose was to arrange and determine ways of development of known decisions and show place of new methods and devices developed by PTIMA NAS of Ukraine in system of multiwavelength pyrometry. Thus, classification of multiwavelength thermometric technologies was performed. Multiwavelength methods were divided on 2 groups and 43 subgroups according to principles of measurements.

Keywords

multiwavelength pyrometry of emission, metallurgy, emissivity, primary measurement information, algorithms of primary measurement information's processing, multiwavelength temperatures of emission

Поступила 29.09.2015