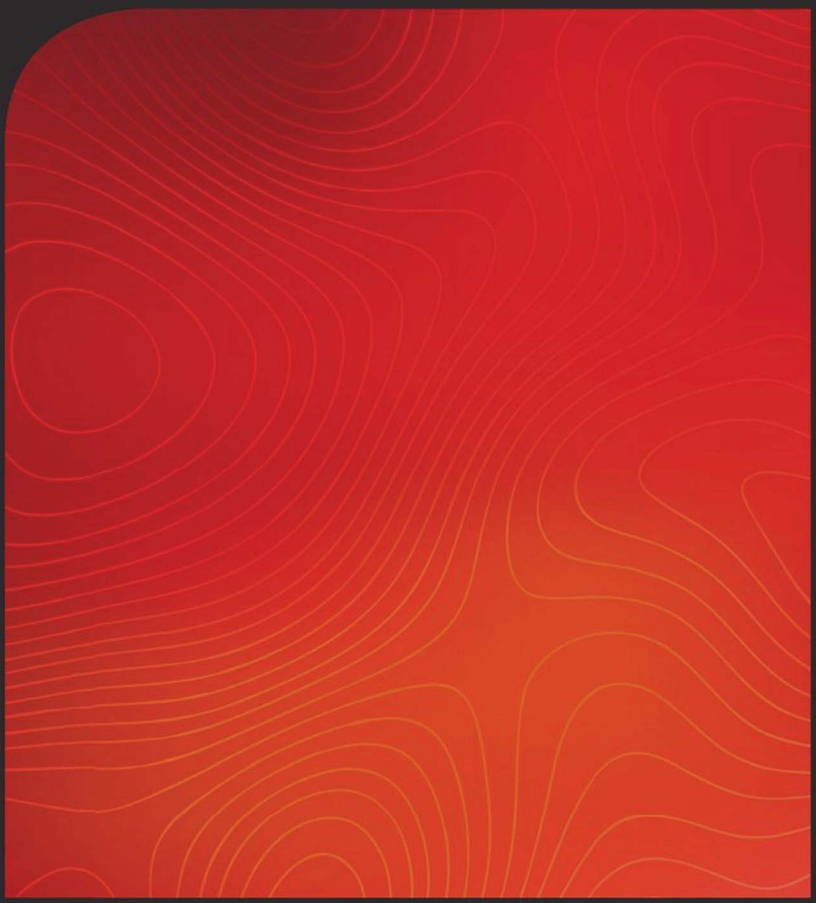
А. В. Фрунзе



ПИРОМЕТРИЯ XXI ВЕКА

«Инфра-Инженерия»

УДК 536.24
ББК 31.32-5
Ф93

Рецензенты:
профессор, доктор технических наук, профессор МИРЭА
(Российского технологического университета)
Битюков Владимир Ксенофонтович;
профессор, доктор технических наук, профессор Северо-Кавказского
горно-металлургического института
(государственного технологического университета)
Беленький Анатолий Матвеевич

Фрунзе, А. В.

Ф93 Пирометрия XXI века : монография / А. В. Фрунзе. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2024. – 192 с. : ил., табл.

ISBN 978-5-9729-2010-5

Рассмотрена физика функционирования современных пирометров, включающих в себя энергетические пирометры (радиационные, яркостные, частичного излучения) и пирометры спектрального отношения. Проанализированы методы пирометрии. Даны различные варианты классификации современных пирометров – в соответствии с реализуемыми методами, с типами приемников излучения, с конструктивным исполнением, и с областями применения. Значительное внимание уделено методическим и инструментальным погрешностям, присущим пирометрии. Собраны воедино и описаны все известные на момент написания книги методические погрешности, даны соотношения, позволяющие их скомпенсировать. Рассмотрены метрологические проблемы всех методов пирометрии, показаны пути их решения. Описан алгоритм нахождения излучательной способности по пяти яркостным температурам.

Для научных работников, метрологов, инженеров и технологов, работающих в области бесконтактных измерений температуры, а также для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата, магистратуры и специалитета при изучении дисциплин «Теплофизика», «Технологические измерения», «Тепловое проектирование радиоэлектронных средств», «Метрология» и других близких технических и инженерно-физических направлений и специальностей.

УДК 536.24
ББК 31.32-5

ISBN 978-5-9729-2010-5

© Фрунзе А. В., 2024
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2024
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2024

ГЛАВА 1. ПИРОМЕТРИЯ КАК НАУКА И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ

По давней традиции, восходящей к [11], пирометрию считают совокупностью методов измерения температуры нагретых тел по их тепловому излучению. Правда, до 60-х годов XX столетия к пирометрии также относили и все методы измерения температуры, превышающей предельную для ртутных термометров [12]. Но в последние полвека контактные измерения температуры к пирометрии не относят.

Однако многие по-прежнему рассматривают пирометрию лишь как некоторую совокупность методов измерений, опирающихся на те или иные законы оптики и теплового излучения. В самостоятельный раздел науки пирометрию обычно не выделяют. А коль скоро пирометрию по инерции считают совокупностью методов, то исследователи вплоть до настоящего времени занимались именно методами – их разработкой, совершенствованием, решением возникающих при реализации используемого метода проблем, поиском новых методов. При этом они не пытались охватить взглядом все методы разом, и в первую очередь – общие для всех этих методов проблемы.

Настала пора определить пирометрию не как совокупность методов, а как самостоятельный раздел науки. Соответственно, обобщить проблемы всех методов, увидеть, что проблемы всех методов имеют единое происхождение, и понять, что решать нужно проблемы раздела науки в целом, тогда решатся и частные проблемы. И коль скоро в названии науки присутствует корень «…метрия», решение проблем должно происходить с учетом требований метрологии.

Одной из задач настоящей книги является, если так можно выразиться, перевод пирометрии из категории «совокупности методов измерений» в самостоятельный раздел науки. И то, что второй корень названия этого раздела науки («…метрия») звучит как сугубо прикладной, никого не должно смущать. Ведь никто же не отказывает геометрии в праве быть разделом науки, несмотря на то, что она оканчивается на ту же прикладную «…метрию». Совокупность методов перерастет в науку, когда их частные проблемы будут обобщены, сформулированы основные задачи, решение которых снимет упомянутые проблемы, и когда будут проработаны пути решения этих задач. Одновременно более общий и широкий взгляд на формирующийся новый раздел науки даст возможность осмысленнее, чем ранее, двигаться дальше и получать новые интересные результаты, необходимые для этого движения.

Поэтому назовем пирометрией область науки, решающей обратную задачу в теории излучения – определение температуры объекта по его тепловому излучению.

Известно, что зависимость цвета нагретого тела от его температуры замечена людьми уже давно. Так, на Древнем Востоке при закалке булатной стали её нагревали до цвета солнца на закате. В металлургии вплоть до XIX века пользовались цветовыми температурными шкалами и, разогревая сталь в том

или ином технологическом цикле, кузнец четко знал, до какого цвета её надо довести, прежде чем начинать обработку.

В конце XIX века появились первые пирометры – приборы, измерявшие температуру нагретых металлов. Измерения проводились путем сравнения цвета металла с цветом нагреваемой проволочки, изображение которой оптикой прибора совмещалось в окуляре с изображением измеряемого металла. И здесь впервые встал вопрос о том, как калибровать такие средства измерений (СИ). По мнению автора, именно этот момент можно считать моментом зарождения пирометрии.

Для пирометрии одним из фундаментальных понятий является идеальный излучатель – абсолютно чёрное тело, АЧТ. Его определяющим физическим свойством является то, что он поглощает абсолютно все падающее на него электромагнитное излучение, на любых длинах волн. При нагреве же он излучает, и именно излучательные свойства АЧТ легли в основу пирометрии.

Понятие АЧТ введено Кирхгофом в 60-х годах XIX века. Последующими работами в области термодинамики Стефан, Больцман, Вин, Рэлей, Джинс и Планк сформулировали законы, которым подчиняется излучение АЧТ.

Необходимо отметить, что АЧТ – это идеальный излучатель, в природе не существующий. В конце XIX – начале XX веков были созданы реальные физические модели АЧТ – так называемые МЧТ, модели чёрного тела. Их излучательные свойства очень близки к излучательным свойствам АЧТ, с точностью до единиц, а то и долей процента. МЧТ широко представлены в метрологических лабораториях, аккредитованных в области пирометрии. Именно МЧТ и стали устройствами, на которых калибруют пирометры.

Однако выше было упомянуто, что излучение реальных объектов в подавляющем большинстве случаев отличается от излучения АЧТ как по спектру, так и по величине излучаемого энергетического потока. И это стало источником погрешностей в измерениях. Наиболее показательным является следующий пример. В металлической кастрюле с полированной внешней стенкой нагревается вода до кипения. Половина этой стенки по какой-то причине закопчена. Измеряя пирометром температуру этой закопчённой части стенки, мы получим результат в пределах 93…97 °С. Проведя то же измерение на чистой, полированной части стенки, мы получим результат, на 40…50 °С меньший. Причина в том, что поток излучаемой энергии от полированной металлической поверхности в 20…40 раз меньше, чем от закопчённой при той же температуре.

Для минимизации подобных ошибок было предложено каждому реальному объекту поставить в соответствие некий коэффициент, показывающий, какую часть от излучения АЧТ излучает данный объект. Этот коэффициент назвали излучательной способностью. Предполагалось, что с течением времени для большинства материалов, используемых в технике, будет создана база таких коэффициентов, и пользуясь ими, можно будет сделать погрешности измерений пирометрами минимальными.

Однако все оказалось гораздо сложнее. В 1916 году Вортинг [13] показал, что излучательная способность вольфрама сильно зависит от длины волны

излучения.* И более того, она оказалась зависящей ещё и от температуры излучающего объекта. Уже в первой половине XX века было показано, что подобными свойствами обладают многие металлы. К концу XX века стало ясно, что практически для любого материала, температуру которого нам приходится измерять пирометром, излучательная способность зависит и от температуры материала, и от длины волны излучения.

Таким образом, тепловой поток от нагретого объекта определяется не только температурой объекта, но и его излучательной способностью. Последняя при этом сложным образом зависит и от длины волны излучения, и от температуры объекта. Учесть обе составляющие долгое время не представлялось возможным. Поэтому о влиянии излучательной способности в пирометрии старались вспоминать как можно реже. Калибровки пирометров, как отмечалось, проводят на АЧТ. Это с одной стороны исключило неоднозначность калибровок, но с другой – исключило из них и саму излучательную способность.

До настоящего момента так и не удалось найти способ метрологически корректного учёта её влияния, приемлемого абсолютно во всех случаях, особенно для практических применений в условиях реального производства. От этого влияния пытались изящно избавиться, вводя понятия радиационной, яркостной, цветовой и т. п. температур. Это делало теоретические построения более строгими, но производственникам от этого легче не становилось – их интересовала именно температура измеряемого объекта, а не связанная с ней непонятным для них образом радиационная или цветовая температура.

Не справившись самостоятельно с учётом влияния излучательной способности, наука переложила решение этой проблемы на плечи пользователей. Пирометры снабдили органом регулировки, позволяющим менять вводимый в пирометр коэффициент, что влекло за собой изменение результата измерений. Этот коэффициент многие до сих пор называют излучательной способностью, создавая ещё одну терминологическую путаницу. Излучательная способность – это величина, зависящая от многих параметров, в первую очередь от длины волны излучения и от температуры излучающего объекта. То есть, выражаясь языком математики, функция двух переменных. Коэффициент же – это не функция, а число. Поэтому называть и то, и другое одним и тем же термином неправомерно.

---

* Объекты, у которых спектральная излучательная способность изменяется с длиной волны, в данной книге будем называть «несерыми», в отличие от «чёрных» и «серых», у которых излучательная способность от длины волны не зависит. Ранее часто использовавшийся в российской литературе для обозначения таких объектов термин «селективные излучатели» с точки зрения автора крайне неудачен – селективными излучателями в действительности являются спектральные лампы с полым катодом и иные источники, излучающие только на определённых длинах волн или только в определённых конечных спектральных диапазонах. Источники теплового излучения в этом смысле неселективны, т. к. обладают непрерывным спектром. Называя некоторые из них селективными излучателями, мы одним и тем же термином описываем принципиально различные источники, что обычно приводит к терминологической путанице. Поэтому лучше отказаться от термина «селективный излучатель» применительно к источникам теплового излучения и использовать иную терминологию. Поскольку в теории излучения уже более столетия применяются термины «чёрное тело» и «серое тело», логично объекты, у которых излучательная способность зависит от длины волны, именовать схожим образом. Предлагается называть такие объекты «несерыми объектами» («несерыми телами»).

Да, этот вводимый в пирометр коэффициент связан с излучательной способностью измеряемого объекта. Но это не меняет его сути, он всё равно остается коэффициентом. Поэтому корректнее его называть коэффициентом излучения, коэффициентом черноты, степенью черноты и т. п. В этой книге далее он будет называться коэффициентом излучения.

Однако наука пока не дала пользователям ни четких рекомендаций по выбору этих коэффициентов, ни понимания того, что для пирометров, имеющих различные спектральные характеристики, коэффициент излучения одного и того же материала в одних и тех же условиях может быть разным. Данные о коэффициентах излучения пользователи чаще всего берут из каких-либо справочных таблиц, либо из руководств по эксплуатации пирометров, обычно составленных по данным подобных таблиц. Однако в этих таблицах, как уже отмечалось, отсутствует информация о том, какому спектральному диапазону соответствуют приведённые значения. В результате всегда существует вероятность того, что пользователь введёт в свой пирометр значение коэффициента излучения, соответствующее пирометру с иным диапазоном спектральной чувствительности. А это (см. главу 6) – дополнительная систематическая методическая погрешность, ее величина запросто может превысить 10 %, даже если для измерений используется пирометр с собственной инструментальной погрешностью менее 1 %. Производственники часто сталкиваются с подобными фактами, и тем, кто продает пирометры, нередко приходится выслушивать по этому поводу кучу неприятных слов.

Но и это еще не всё. Как было сказано выше, приводимые в справочной литературе коэффициенты излучения даны без каких-либо присущих им погрешностей. То есть, один из основных параметров, используемых при измерении температуры пирометром, имеет **неопределённую** погрешность. А коль так, то в соответствии с правилами метрологии неопределённую погрешность имеет и весь результат. Неприемлемость этого очевидна, но метрологи стараются это не замечать.

Это только малая часть проблем, связанных с излучательной способностью. По сути, все методы испытывают связанные с ней проблемы и ограничения. И поэтому дальнейший прогресс пирометрии как самостоятельного раздела науки требует всеобъемлющего учёта влияния на результат измерений излучательной способности.

ГЛАВА 2. КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОСНОВНЫХ ЗАКОНАХ ИЗЛУЧЕНИЯ НАГРЕТЫХ ТЕЛ. ЧАСТО УПОМИНАЕМЫЕ СООТНОШЕНИЯ

Физической основой методов пирометрии служат законы излучения нагретых тел, кратко перечисленные в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Краткий перечень основных законов, на которые опирается пирометрия

Закон	Содержание	Математическое выражение
Сохранения энергии	Связь между потоком излучения $Q_{пад}$, падающим на объект, и поглощённым $Q_{погл}$, отражённым $Q_{отр}$ и пропущенным $Q_{проп}$ потоками излучения	$Q_{пад} = Q_{отр} + Q_{проп} + Q_{погл}$
Планка	Связь между потоком излучения E_λ в узком интервале $d\lambda$, длиной волны излучения λ и температурой абсолютно черного тела T	$E_\lambda = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \cdot d\lambda$
Вина	Приближение закона Планка при малых λT	$E_\lambda = c_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot d\lambda$
Рэлея – Джинса	Приближение закона Планка при больших λT	$E_\lambda = \frac{c_1}{c_2} \cdot \frac{T}{\lambda^4} \cdot d\lambda$
Кирхгофа	Связь между интегральным потоком излучения E_t излучающего объекта и интегральным потоком излучения $E_t^{АЧТ}$ АЧТ	$E_t / \eta = E_t^{АЧТ}$
Стефана – Больцмана	Связь между интегральным потоком излучения $E_t^{АЧТ}$ АЧТ и его температурой T	$E_t^{АЧТ} = \sigma_0 \cdot T^4$

Здесь σ_0 – постоянная Стефана – Больцмана, $\sigma_0 = (5{,}6687 \pm 0{,}0010) \cdot 10^{-8}$ Вт/(м^2 · · К^4); c_1 и c_2 – константы излучения, в настоящее время их принимают равными $c_1 = 3{,}7413 \cdot 10^{-16}$ Вт · м^2, $c_2 = 1{,}4380 \cdot 10^{-2}$ м · К.

2.1. Несколько важных соотношений

Соотношение, связывающее действительную температуру объекта $T_д$* с его яркостной $T_я$ температурой [7, с. 350]:

$$\frac{1}{T_д} = \frac{1}{T_я} + \frac{\lambda}{c_2} \ln \varepsilon_\lambda , \qquad (2.1)$$

* В данной книге везде, где для обозначения температуры использована заглавная буква T, подразумевается абсолютная температура (в К). Если для обозначения используется строчная буква t, речь идет о температуре в градусах Цельсия.

где $T_д$ – действительная температура, К;
$T_я$ – измеренная пирометром яркостная температура, К;
$c_2 = 1{,}4380 \cdot 10^{-2}$ м · К;
λ – рабочая длина волн монохроматического яркостного пирометра, м;
ε_λ – коэффициент излучения объекта на длине волны λ.

Соотношение, связывающее действительную температуру объекта $T_д$ с его радиационной $T_р$ температурой [7, с. 355]:

$$T_д = T_р / \sqrt[4]{\varepsilon_s}\,, \tag{2.2}$$

где $T_д$ – действительная температура, К;
$T_р$ – измеренная пирометром радиационная температура, К;
ε_s – интегральный коэффициент излучения.

Соотношение, связывающее действительную температуру объекта $T_д$ с его температурой спектрального отношения [7, с. 351]:

$$\frac{1}{T_д} - \frac{1}{T_{сп.отн}} = \ln\frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}\frac{1}{c_2}\frac{1}{\dfrac{1}{\lambda_1} - \dfrac{1}{\lambda_2}}\,, \tag{2.3}$$

где $T_д$ – действительная температура, К;
$T_{сп.отн}$ – измеренная пирометром температура спектрального отношения, К;
$c_2 = 1{,}4380 \cdot 10^{-2}$ м · К;
λ_1 и λ_2 – рабочие длины волн узкополосного пирометра спектрального отношения, м;
ε_{λ_1} и ε_{λ_2} – коэффициенты излучения на длинах волн λ_1 и λ_2.

ГЛАВА 3. ПИРОМЕТРЫ И ИХ СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ

3.1. Пирометры с исчезающей нитью

Утверждается, что первый пирометр изобрёл в XVIII веке голландский учёный Питер Ван Мушенбрук. Однако автор не располагает данными о том, создан ли был этот прибор, и использовался ли он где-либо на практике.

Реальная пирометрия возникла в конце XIX века. Первые пирометры, упоминания об использовании которых можно найти в российской литературе, были визуальными оптическими приборами. В [3] на с. 30 со ссылкой на воспоминания Д. И. Менделеева говорится о создании в 80-х годах XIX столетия на Урале Д. К. Поленовым оптического визуального пирометра и об успешном его использовании на одном из уральских металлургических заводов. Аналогичным был и первый в Западной Европе пирометр Ле-Шателье, о котором упоминается в [14] на с. 79. Таким образом, первой была реализована именно оптическая (визуальная) пирометрия.

Конструкция визуального оптического пирометра приведена на рис. 3.1. Яркость или цвет исследуемого тела сравнивается с яркостью (цветом) нити фотометрической лампы накаливания *с*, являющейся в данном случае обращённым преобразователем. Яркость (цвет) нити зависит от тока, величина которого регулируется изменением сопротивления реостата *е*. Объектив пирометра *а* направляют на раскалённое исследуемое тело таким образом, чтобы наблюдатель, смотрящий в окуляр *е*, видел на фоне раскалённого тела нить лампы *в*.

Изменяя силу тока в фотометрической лампе, добиваются совпадения яркости (цвета) нити и исследуемого тела (рис. 3.2, *а*). Кстати, отсюда пошло и распространённое в литературе название подобных пирометров – пирометры с исчезающей нитью. Другое название этих пирометров, не менее распространенное – оптические пирометры.

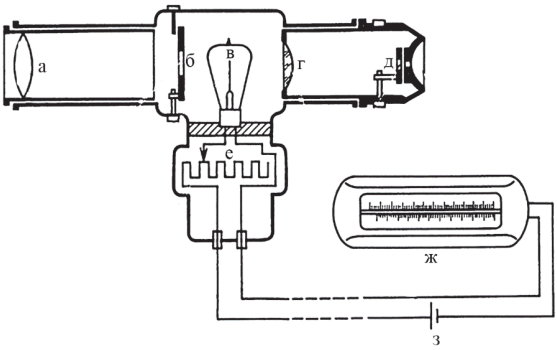


Рисунок 3.1. Пирометр с исчезающей нитью:
а – объектив; б – диафрагма; в – лампа со спиралью сравнения; г – оборотная линза;
д – окуляр; е – реостат; ж – шкала измерительного прибора; з – источник питания

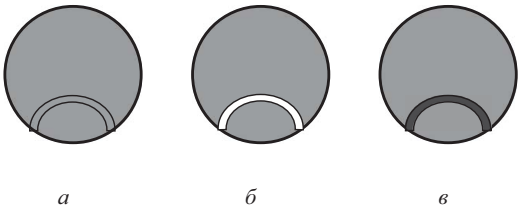


Рисунок 3.2. Изменение яркости нити по отношению к яркости исследуемого объекта: а – совпадают; б – яркость нити больше яркости объекта; в – яркость нити меньше яркости объекта

На рис. 3.2 *б*, *в* соответственно изображены картины, которые видит глаз наблюдателя в том случае, если яркость нити больше или меньше яркости исследуемого тела.

Прибор отградуирован таким образом, что его показания соответствуют измеряемой температуре при совпадении яркости нити и исследуемого объекта.

Внешний вид одного из выпускавшихся в первой четверти XX века пирометров с исчезающей нитью – «Pyropto» немецкой фирмы Hartmann und Braun – приведён на рис. 3.3 [15, с. 317].

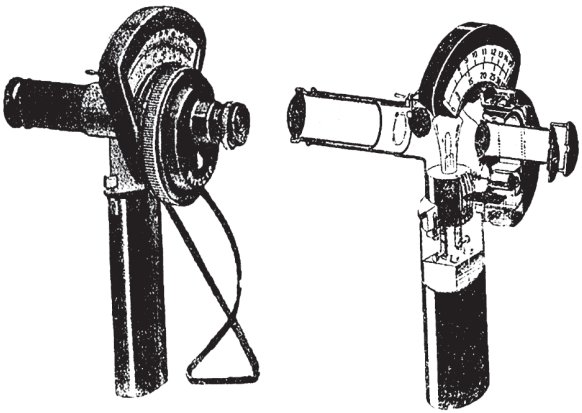


Рисунок 3.3. Пирометр с исчезающей нитью «Pyropto» немецкой фирмы Hartmann und Braun, 1928 г. ([15])

В первой половине XX века пирометры с исчезающей нитью получили весьма широкое распространение. В книге [15], выпущенной в 1932 году, описано 15 различных оптических пирометров, в том числе и пирометр, выпускавшийся в России в ходе Первой мировой войны (!).

3.2. Энергетические пирометры*

Однако в силу особенностей человеческого зрения описанный метод при опоре на восприятие цвета глазом имеет серьёзные ограничения в точности и сходимости (а тем более воспроизводимости!) результатов измерений. Кроме того, оператор в таком пирометре являлся составной частью всего комплекса, осуществляющего измерение температуры, т. к. в процессе измерения были задействованы его органы зрения. Поэтому организовать непрерывное многочасовое измерение оптическим пирометром было невозможно. Как следствие, невозможно было непрерывно контролировать ход тех или иных технологических процессов, порой длящихся сутками. В связи с этим с развитием компонентной базы весьма субъективные визуальные измерения были вытеснены измерениями при помощи пирометров, снабженных физическими приёмниками излучения, преобразующими энергию излучения в ток или напряжение.

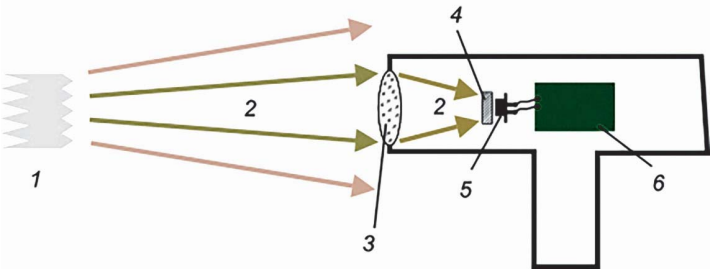


Рисунок 3.4. Блок-схема энергетического пирометра:
1 – нагретый объект; 2 – поток излучения; 3 – объектив; 4 – светофильтр;
5 – приемник излучения; 6 – узел электроники

Вначале появились пирометры, имеющие один приёмник излучения. Сигнал с выхода приёмника был пропорционален потоку энергии, пришедшему на его чувствительную площадку. Поэтому эти пирометры получили название энергетических (в отличие от описанных выше визуальных оптических). Блок-схема энергетического пирометра приведена на рис. 3.4.

Энергетические пирометры определяют температуру объекта по интенсивности его излучения на одной длине волны (или в одном спектральном интервале). У них один приёмник излучения, один усилитель, один преобразователь, и т. д.

Необходимо отметить, что термин «энергетические пирометры» появился в российской литературе относительно недавно. До этого при классификации пирометров в самостоятельные классы выделялись отдельные подклассы энергети-

* Под энергетическими пирометрами понимаются все пирометры, имеющие только один приемник излучения, определяющие температуру по величине сигнала с приемника, т. е. по величине пришедшего на него энергетического потока.

ческих пирометров – яркостные, полного излучения (радиационные) и частичного излучения. При этом определения этих пирометров у разных авторов порой заметно различались [1, 3, 7]. В англоязычной литературе как минимум с середины 70-х годов прошлого столетия [7] эти пирометры нередко объединялись в единый класс энергетических пирометров, что отражало их главную общую черту – наличие одного приёмника излучения, определяющего температуру объектов по величине излучаемого ими потока энергии в том или ином спектральном интервале.

Энергетические пирометры появились в начале XX века, с появлением первых приёмников. Вначале эти пирометры были распространены гораздо меньше визуальных оптических. Так, в уже упомянутой книге [15], энергетических пирометров описано вдвое меньше, чем оптических, всего 8 различных моделей.

Однако к середине прошлого века наметилась обратная тенденция – после появления радиационного пирометра «Radiamatic» американской фирмы «Brown» ([6], рис. 3.5–3.6) его копии начали вытеснять оптические пирометры. На момент написания книги в мире энергетических пирометров разных классов, типов и уровней используется больше, чем всех остальных, вместе взятых.

Помимо универсальных, к энергетическим пирометрам относятся и многочисленные специализированные приборы. Среди них пирометры для измерения температуры алюминия, температуры других цветных и благородных металлов (меди, серебра, золота, латуни и т. д.), температуры пламени, температуры объектов, маскируемых пламенем, температуры стекла, температуры пластмасс, температуры кремниевых пластин, температуры кварца – перечень можно продолжать и продолжать.

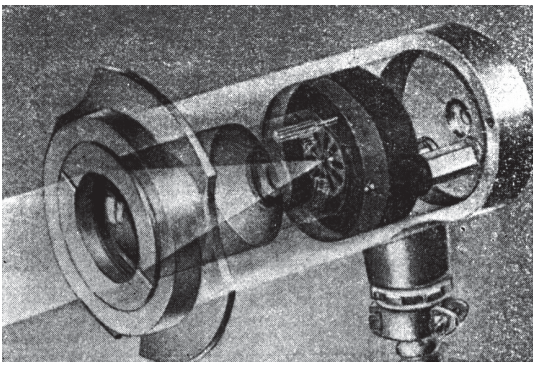


Рисунок 3.5. Радиационный пирометр «Radiamatic» американской фирмы «Brown» ([6])

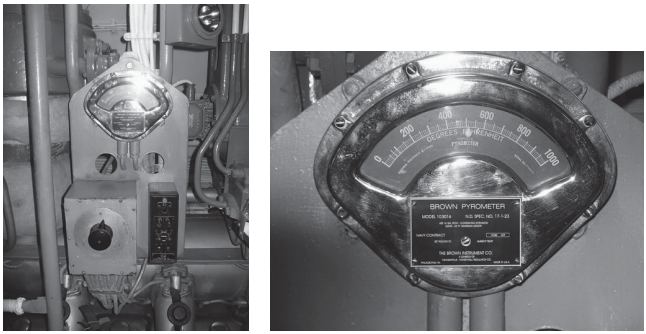


Рисунок 3.6. Радиационный пирометр американской фирмы «Brown» в составе оборудования выставленной в музее Пирл-Харбора американской подводной лодки SS287 «Bowfin» (конец 50-х годов XX века)

Но у них есть ряд существенных недостатков, в первую очередь – необходимость вводить в них перед измерением коэффициент излучения, присущий измеряемому объекту. Он же чаще всего неизвестен и, как уже отмечалось, зависит от большого количества параметров (материала объекта, состояния его поверхности, спектральной чувствительности пирометра, температуры измеряемого объекта). Это сильно затрудняет измерения объектов с малоизученными излучательными характеристиками.

3.3. Пирометры спектрального отношения

Необходимо отметить, что оптические пирометры в XX веке также претерпели заметную трансформацию. С появлением относительно дешёвых светоделительных устройств и светофильтров возникли пирометры спектрального отношения. Эти приборы имеют как минимум два приёмника излучения с различной спектральной чувствительностью. Такие пирометры определяют температуру по величине отношения сигналов с выходов этих приёмников.

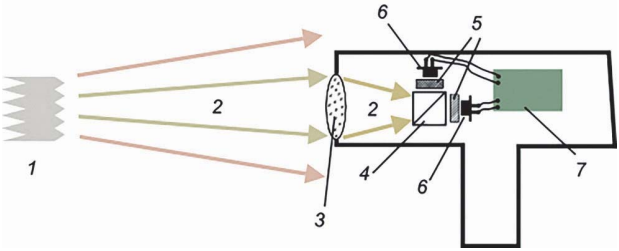


Рисунок 3.7. Блок-схема пирометра спектрального отношения:
1 – нагретый объект; 2 – поток излучения; 3 – объектив; 4 – светоделительный элемент; 5 – светофильтры; 6 – приемники излучения; 7 – узел электроники

Блок-схема пирометра спектрального отношения с двумя приёмниками излучения приведена на рис. 3.7. Существует много разновидностей подобных приборов, различающихся между собой конструкцией оптического узла, в котором происходит разделение энергетического потока по различным спекральным диапазонам. В этих узлах используются светоделительные пластинки (кубики), как на рис. 3.7, дифракционные решётки, световоды, бифокальные линзы и т. п. В последнее время наиболее часто в подобных приборах используют двухслойные (тандемные) фотодиоды. В таких приёмниках один чувствительный слой нанесен поверх второго и играет для нижнего слоя роль светофильтра. Подобные приёмники не требуют дополнительных оптических элементов для разделения потока на диапазоны, поэтому приборы с их применением оказались достаточно дешёвыми, чтобы конкурировать с энергетическими пирометрами.

На момент написания книги практически все мировые производители имели в своих линейках одну или несколько моделей пирометров спектрального отношения. На рис. 3.8 приведен пирометр спектрального отношения «Thermopoint 800» шведской фирмы AGEMA.



Рисунок 3.8. Пирометр спектрального отношения «Thermopoint 800» шведской фирмы AGEMA

В России также есть ряд фирм, производящих пирометры спектрального отношения. В первую очередь здесь необходимо отметить фирму «ТЕРМОКОНТ», предлагающую более десятка моделей, перекрывающих температурный диапазон от 300 до 4500 °С. На рис. 3.9 приведены пирометры спектрального отношения «Термоконт-ТЦ3С7» и «Термоконт-ТЦ4П1».



а *б*

Рисунок 3.9. Пирометры спектрального отношения «Термоконт-ТЦ3С7» (а) и «Термоконт-ТЦ4П1» (б) российской фирмы ТЕРМОКОНТ

3.4. Сравнение пирометров спектрального отношения и энергетических пирометров

Пирометры спектрального отношения сложнее и дороже энергетических. Но они имеют перед энергетическими целый ряд заметных преимуществ (см. табл. 3.1). В связи с этим количество пирометров спектрального отношения в нынешнем столетии заметно увеличилось. Однако в ряде случаев энергетические пирометры безальтернативны. По этим причинам ни те, ни другие не в силах вытеснить друг друга с потребительского рынка.

Энергетические пирометры, как упоминалось, проще пирометров спектрального отношения – у последних принципиально должно быть не менее двух приёмников, усилителей и преобразователей, в то время как энергетические пирометры довольствуются одним комплектом всех необходимых узлов.

Еще одно преимущество энергетических пирометров – более высокая, чем у пирометров спектрального отношения, разрешающая способность [21]. Это предопределило преимущественное использование энергетических пирометров в различных эталонных установках.

Далее, в силу ряда причин энергетические пирометры вне конкуренции при измерении температур ниже 200…250 °С и при работе в узких спектральных диапазонах – например, при контроле температуры стекла, измерении через пламя [17], [18]. Трудно также предположить, что в обозримом будущем пирометрами спектрального отношения можно будет измерять температуру алюминия и его сплавов в диапазоне до 500 °С [19].

Сказанное предрекает методу энергетической пирометрии еще долгие годы жизни. Но, увы, этот метод обладает рядом «врожденных» существенных недостатков, о которых мы уже упоминали.

Основная проблема энергетической пирометрии, как уже говорилось – зависимость результатов измерений от излучательной способности объекта.

То есть, при одной и той же температуре различные тела излучают по-разному – одни сильнее, другие – слабее. Например, при одинаковых температурах поверхность из полированного алюминия излучает в 20…50 раз слабее, чем закопченная. Вольфрам излучает вдвое меньше окисленной стали при равной с ней температуре, и т. д. Если этого не учитывать, то измерения температуры энергетическими пирометрами будет характеризоваться значительными (более 20 %!) погрешностями. Чтобы этого избежать, в энергетические пирометры перед измерением вводят так называемый коэффициент излучения, характеризующий излучательные свойства именно того объекта, температуру которого предстоит измерить. Проблема состоит в том, что пользователь очень часто не знает правильного значения коэффициента излучения. К тому же последний зависит не только от материала измеряемого объекта, но и от состояния его поверхности (шероховатости, загрязненности), от температуры измеряемого объекта и от спектральной чувствительности используемого пирометра. Всё это делает поиск правильного значения коэффициента излучения для каждого конкретного случая измерений довольно сложной задачей.

Помимо зависимости от излучательной способности, энергетические пирометры имеют и ряд иных существенных недостатков [20, 7, 3, 14], выражающихся в том, что результаты измерений зависят от:

– расстояния до измеряемого объекта, формы объекта,

– запылённости и загазованности промежуточной среды,

– наличия защитных стёкол,

– наличия непрозрачных объектов в поле зрения пирометра,

– боковых засветок при работе с крупноразмерными объектами,

– переотражений измеряемым объектом излучения от сильно нагретых объектов, расположенных рядом.

Как видно, факторов, мешающих получению энергетическими пирометрами точных результатов, набирается довольно много. Именно поэтому пользователи, среди которых немало метрологов, всё чаще пытаются использовать пирометры спектрального отношения, более дорогие, чем энергетические, но свободные от всех вышеперечисленных недостатков.

Практически все выпускаемые сегодня пирометры спектрального отношения имеют два приёмника с различающейся спектральной чувствительностью, и определяют температуру по **отношению** сигналов от этих приёмников [3, 7, 9, 12, 21]. Такой принцип измерения температуры позволяет избавиться от всех вышеперечисленных недостатков, свойственных энергетическим пирометрам. Зависимость сигнала от расстояния одинакова для обоих приёмников пирометра спектрального отношения, поэтому на отношение сигналов она не влияет, и у пирометров спектрального отношения нет зависимости результатов измерений от расстояния. Одинаково влияет на сигналы с обоих приемников, оставляя неизменным их отношение, и форма измеряемого объекта, и запылённость, загазованность промежуточной среды. Пирометры спектрального отношения практически нечувствительны к наличию небольших непрозрачных объектов в поле зрения, и также практически нечувствительны к наличию перед

пирометром защитных обычных и кварцевых стёкол* (например, стёкол смотровых окон в вакуумных камерах). Практически при использовании пирометра спектрального отношения не нужно искать правильное значение коэффициента излучения – корректный результат измерения часто получается и без его использования.

Но и пирометры спектрального отношения не лишены серьёзных недостатков. Первым является цена, более высокая, чем у сопоставимых по основным характеристикам энергетических пирометров. Но технический прогресс неумолимо снижает цены и тех, и других приборов.

Вторым недостатком является весьма значительная погрешность, возникающая при измерении пирометрами спектрального отношения температуры «несерых тел», о чем подробнее будет сказано в разделе 6.10.

Достоинства и недостатки этих пирометров сопоставлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Сравнительная таблица свойств пирометров

Параметр	Энергетические пирометры	Пирометры спектрального отношения
Измеряемые температуры	От отрицательных до 3500 °С и выше	От 500 °С до 3500 °С и выше
Минимальная инструментальная погрешность	0,1…0,2 % от результата измерений температуры МЧТ	0,2…0,3 % от результата измерений температуры МЧТ
Стоимость	От 100 до 15 000 долларов США	От 2000 до 20 000 долларов США
Необходимость знать излучательную способность	Есть всегда	Есть лишь для «несерых тел»
Зависимость от расстояния	Есть	Отсутствует
Зависимость от запылённости	Есть	Отсутствует
Зависимость от формы объекта	Есть	Отсутствует
Зависимость от наличия посторонних объектов в поле зрения	Сильная	Слабая
Зависимость от наличия шлака на поверхности объекта измерения	Сильная	Слабая
Зависимость от боковых засветок	Сильная	Сильная
Зависимость от отражений от более горячих объектов	Сильная	Сильная
Зависимость от наличия стёкол в поле зрения прибора	Сильная	Практически отсутствует
Возможность измерения объектов меньше пятна поля зрения	Нет	Есть

В данной таблице отсутствует столбец, посвященный цветовым пирометрам, поскольку последние сегодня уже не разрабатываются и не выпускаются.

* Стекла не должны быть цветными.

3.5. Классификация пирометров

В силу многообразия решаемых пирометрами задач этот класс средств измерений весьма многообразен. Производители выпускают десятки моделей пирометров, различающихся принципом действия, спектральным диапазоном, конструктивным исполнением, и т. д. Такое разнообразие типов, классов и исполнений пирометров нередко при выборе прибора ставит в тупик не только новичков, но и опытных пользователей. Менеджеры фирм, продающих пирометры, предлагая свой товар, акцентируют внимание пользователей на тех или иных особенностях своих приборов, при этом уходя от сравнительных и сопоставимых оценок с изделиями других фирм. По этой причине неискушенному пользователю трудно найти аналог расхваливаемого менеджером прибора в линейке другого производителя и прямо сопоставить характеристики и цены.

Ниже описаны варианты классификации пирометров согласно реализуемым методам, в соответствии с типом приёмников, с конструктивным исполнением, согласно областям применения и в соответствии с их метрологическими характеристиками.

3.5.1. Классификация согласно реализуемым методам пирометрии

Наиболее общим вариантом классификации пирометров является классификация по принадлежности к методам пирометрии [22]. То есть, в соответствии с реализуемыми методами, все многообразие существующих сегодня пирометров можно разделить на три большие группы – цветовые пирометры (в том числе пирометры с исчезающей нитью), пирометры спектрального отношения и энергетические пирометры (рис. 3.10).

Начнем с пирометров спектрального отношения. Необходимо отметить, что их возможно классифицировать по числу независимых спектральных каналов (рис. 3.11). Подавляющее большинство пирометров спектрального отношения – двухканальные, т. е. имеют два приёмника.

Трёх-, четырёхканальные пирометры и приборы с большим числом каналов можно объединить в одну группу, т. к. различие между ними скорее количественные, чем качественные.



Рисунок 3.10. Классификация пирометров согласно реализуемым методам

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕЦЕНЗЕНТА 3
ВВЕДЕНИЕ 5
ГЛАВА 1. Пирометрия как наука и ее основные проблемы 9
ГЛАВА 2. Краткие сведения об основных законах излучения нагретых тел. Часто упоминаемые соотношения 13
ГЛАВА 3. Пирометры и их современная классификация 15
ГЛАВА 4. Методы пирометрии и их современная классификация 41
ГЛАВА 5. О понятиях радиационной, яркостной, цветовой и иных псевдотемператур 45
ГЛАВА 6. Систематические погрешности, присущие пирометрам 48
ГЛАВА 7. Основной методологический постулат пирометрии и необходимость его пересмотра 89
ГЛАВА 8. Коррекция методических погрешностей пирометров с использованием вычисленной градуировочной функции 102
ГЛАВА 9. Комплект простых программ для расчета градуировочных и калибровочных функций 108
ГЛАВА 10. Исключение систематической методической погрешности при измерении пирометром спектрального отношения температуры объекта с известной спектральной излучательной способностью 116
ГЛАВА 11. Учет температурной зависимости спектральной излучательной способности объекта для пирометров спектрального отношения 120
ГЛАВА 12. Определение действительной температуры объекта энергетическим пирометром с учетом температурной зависимости излучательной способности объекта 124
ГЛАВА 13. Метрологические проблемы современной пирометрии 133
ГЛАВА 14. О необходимости первичного эталона излучательной способности и требованиях к нему 153
ГЛАВА 15. О возможности определения температуры неисследованных объектов по пяти яркостным температурам 160
ГЛАВА 16. Пирометрия недалёкого будущего 165
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 169
ПРИЛОЖЕНИЕ 1 174
ПРИЛОЖЕНИЕ 2 176
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 177
ПРИЛОЖЕНИЕ 4 186