



ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

А. Неделько, ОАО "НПП "Эталон"

Большое разнообразие предлагаемых рынком пирометров затрудняет их правильный выбор. В статье сформулированы преимущества и недостатки различных типов пирометров. Приведены основные факторы измерительного эксперимента, влияющие на точность результатов измерения пирометров, что крайне актуально для практиков.

Если до начала 70-х годов прошлого столетия основными приборами для пирометрических измерений являлись пирометры с исчезающей нитью накала, то в последние годы, благодаря бурному развитию электронных и цифровых технологий, появилось большое разнообразие приборов для бесконтактного измерения температуры по тепловой радиации (пирометров).

Поэтому для исследователей и инженеров крайне актуален вопрос сравнительной оценки различных типов пирометров, а также определение преимуществ и недостатков самого пирометрического метода. Преимущества пирометрических методов измерения температуры перед контактными известны:

- высокое быстродействие, определяемое типом приемника излучения и схемой обработки электрических сигналов. При использовании квантовых приемников излучения (фотодиодов) и быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) постоянная времени может составлять 10^{-2} – 10^{-6} с;
- возможность измерения температуры движущихся объектов и элементов оборудования, находящихся под высоковольтным потенциалом;
- отсутствие искажения температурного поля объекта контроля, что особенно актуально при измерении температуры материалов

с низкой теплопроводностью (дерево, пластик и др.), а также риска повреждения поверхности и формы в случае мягких (пластичных) объектов;

- возможность измерения высоких температур, при которых применение контактных средств измерения либо невозможно, либо они быстро выходят из строя;
- возможность работы в условиях повышенной радиации и температуры окружающей среды (до 250°) при разнесении приемной головки и электроники пирометра с помощью оптоволоконного кабеля.

Но основной недостаток пирометрических измерений температуры – трудность полного учета связей между термодинамической температурой объекта и регистрируемой пирометром тепловой радиацией [1]. Необходимо учитывать изменение излучательной способности поверхности ϵ от длины волны λ в регистрируемом спектральном диапазоне и от температуры T в диапазоне измерений, наличие поглощения излучения в среде между пирометром и объектом контроля, геометрические параметры поля зрения пирометра и его оптической системы, температуру окружающей среды и корпуса прибора.

Какие же основные факторы влияют на точность результатов измерений пирометром.

Во-первых, известно, что пирометр, измеряя поток теплового излучения с некоторой части поверхности объекта в рабочей области спектра, вычисляет его температуру. Либо, особенно в пирометрах спектрального отношения, используют отношение потоков в двух и более областях спектра [2].

Для расчета плотности излучения в заданном спектральном интервале применяют закон Планка, который является основным и наиболее общим законом в теории теплового излучения:

$$E(\lambda, T) = \frac{\varepsilon \times C_1}{\lambda^5 \times \left(e^{\frac{C_2}{\lambda \times T}} - 1 \right)} \text{ Вт/см}^3,$$

где ε – излучательная способность, C_1 и C_2 – первая и вторая постоянные Планка, λ – длина волны, T – температура.

Для непрозрачных тел справедливо выражение: $\varepsilon = A = 1 - R$, где A – коэффициент поглощения, R – коэффициент отражения. Объект с $R = 0$ (т.е. полностью поглощающий падающее на него излучение), обладает наибольшей излучательной способностью. У него $\varepsilon = 1$, и его называют "абсолютно черным телом" (АЧТ). Реальные объекты имеют излучательную способность меньше 1 и, следовательно, излучают меньше энергии. Проблема заключается в том, что для большинства реальных объектов излучательная способность зависит от температуры и длины волны, т.е. $\varepsilon = f(\lambda, T)$, а также от многих других факторов: материала и формы объекта, состояния поверхности, наличия оксидной пленки, конденсата влаги и т.п. (рис. 1).

Дерево, пластик, органические материалы, камень, графит имеют излучательную способность около 0,8–0,95, а у металлов, наоборот, излучательная способность может изменяться в очень широких пределах, все зависит от температуры и длины волны. Поверхность расплавленного металла образует гладкое зеркало, излучательная способность которого может быть менее 0,1, а излучательная способность плавающего на поверхности шлака может достигать значений 0,9–0,95.

Для корректного измерения температуры необходимо точно указать пирометру излучательную способность объекта [3,4]. В современной пирометрической практике для ее определения используют следующие способы:

- Учитывая данные из справочных таблиц, приводимые обычно в руководстве на пирометр или в справочниках (заметим, этот способ самый простой, но наименее точный);
- измерение температуры объекта контактным способом (например, поверхностной

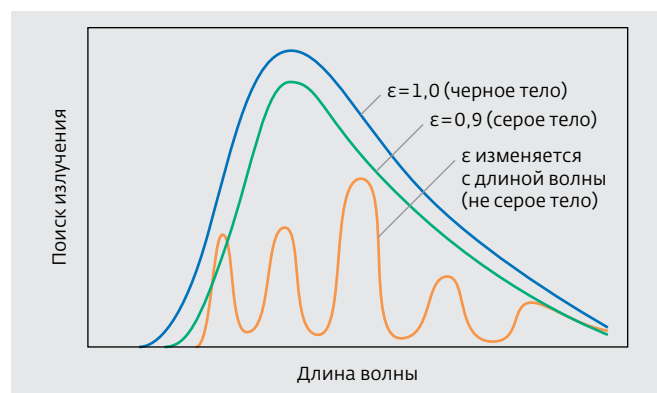


Рис.1. Сравнение излучательной способности АЧТ и реальных объектов

термопарой). Затем, изменяя значение излучательной способности на задатчике пирометра, добиваются равенства показаний пирометра и термопары. Если по каким-либо причинам измерение температуры объекта контактным способом невозможно, эту процедуру проводят с образцом материала объекта, нагревая его до температуры, близкой к температуре объекта. Некоторые модели пирометров имеют разъем для подключения термопары и могут измерять температуру контактным и бесконтактным способом одновременно;

- просверлив в объекте (или в образце материала объекта) отверстие, внутри него при помощи пирометра измеряют температуру. При этом диаметр отверстия должен соответствовать диаметру поля зрения пирометра, а глубина составлять величину, большую в пять раз, чем диаметр. Тогда излучательную способность созданной таким образом модели АЧТ можно принять равной 1. Затем надо навести пирометр на неповрежденную поверхность объекта и, меняя значение излучательной способности на задатчике пирометра, добиться показаний, близких к полученным ранее по модели АЧТ. Этот способ наиболее трудоемкий и приемлем только в том случае, когда перепад температур по длине отверстия незначителен;
- при невысоких температурах иногда часть поверхности объекта окрашивают черной матовой краской, излучательную способность которой можно принять равной 0,95. Далее измеряют температуру окрашенной поверхности пирометром, а затем по описанной выше методике определяют излучательную способность неокрашенной поверхности.

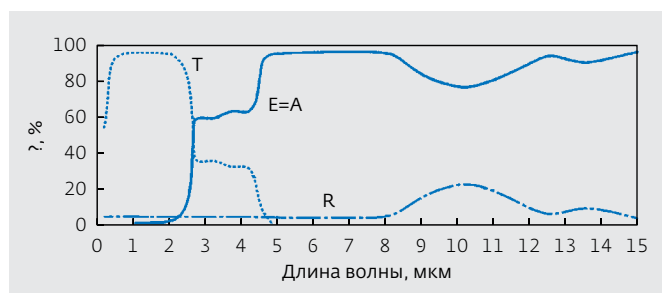


Рис.2. Оптические характеристики стекла при 25°C. Т – пропускание, R – отражение, А – поглощение, E – излучательная способность. $A+R+T=1$

Во-вторых, между пирометром и объектом не должны стоять препятствия, непрозрачные в рабочей области спектра пирометра. В противном случае, из-за уменьшения потока излучения, показания пирометра будут занижены. Объект измерения, напротив, должен быть непрозрачным в данной области спектра. Для примера возьмем обычное оптическое стекло при 25°C (рис.2).

Когда необходимо измерить температуру самого стекла, следует использовать пирометр, работающий в той области спектра, в которой стекло наименее прозрачно. Как видно из рис.2, при 25°C такой областью является 5-8 мкм. Если проводить измерения пирометром, работающим в области 1-2 мкм, то будет измерена температура не стекла, а объектов, находящихся за стеклом (следует заметить, что при температуре выше 1000°C стекло становится непрозрачным в области 1-2 мкм).

Содержание в воздухе перед объектом значительного количества пыли, дыма или пара снижает точность измерений, так как происходит

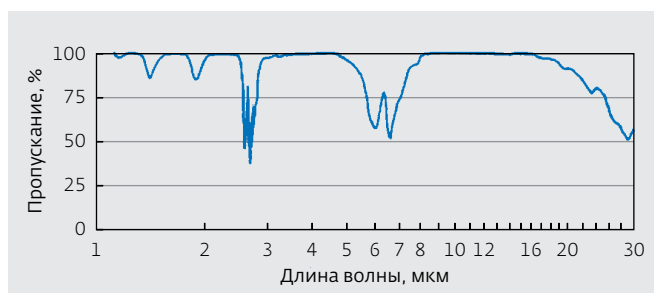


Рис.3. Пропускание 1 м воздуха при температуре 32°C и влажности 75%

селективное (в определенном диапазоне длин волн) или сплошное ослабление теплового излучения объекта. Селективное поглощение теплового излучения происходит даже в абсолютно чистом воздухе из-за поглощения газами, входящими в его состав (в основном CO, CO₂, H₂O), что приводит к зависимости показаний пирометра от расстояния до объекта. Существуют так называемые "окна прозрачности" атмосферы (1-1,7; 2-2,5; 3-5 и 8-14 мкм), в которых поглощение минимально (рис.3). Если использовать в пирометре оптические фильтры (германиевые, кремниевые и др.), то погрешность, возникающая из-за поглощения атмосферой, сведется к минимуму при условии попадания в "окно прозрачности".

Значительные погрешности возникают также при загрязнении поверхностей оптической системы пирометра. Это приводит к необходимости их периодической очистки или, в особо тяжелых условиях, к непрерывному обдуву чистым воздухом.

В-третьих, надо учитывать геометрические параметры оптических систем. Оптическая система формирует поле зрения пирометра – область

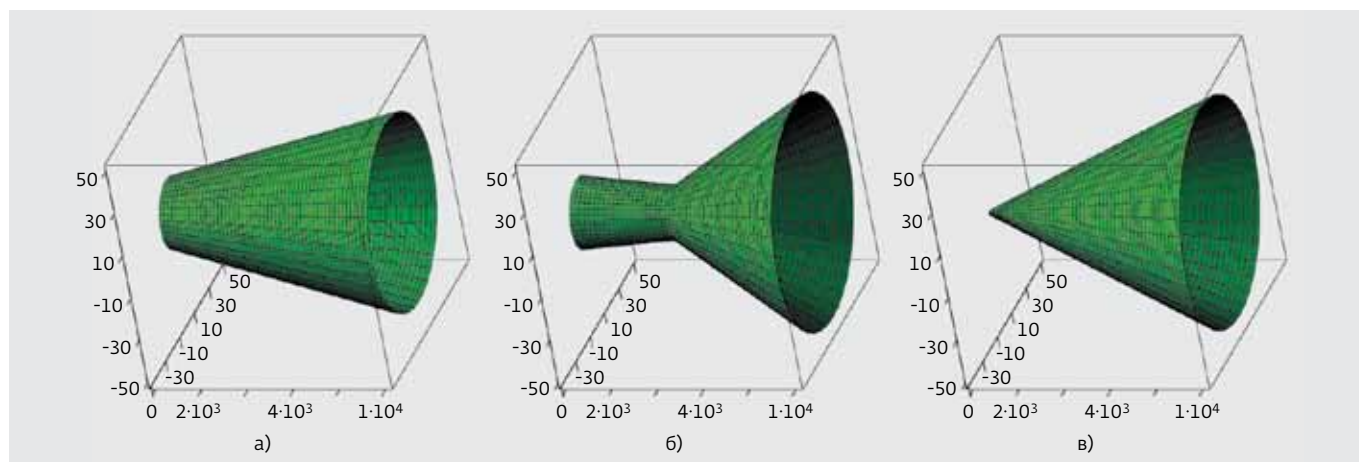


Рис.4. Поле зрения пирометра при разных вариантах конструкции оптической схемы (расстояния указаны в миллиметрах)

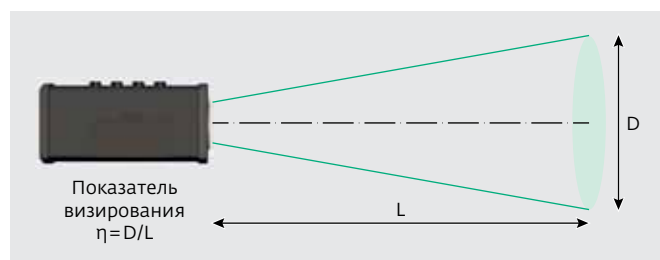


Рис.5. Определение показателя визирования

пространства, в пределах которой измеряют температуру. Для корректного проведения измерений необходимо, чтобы объект полностью перекрывал поле зрения прибора. В противном случае, во-первых, поток теплового излучения, попадающий на приемник (датчик) пирометра от объекта измерения, уменьшится пропорционально сокращению перекрываемой объектом площади. Во-вторых, на приемник будет попадать излучение заднего фона (объектов, расположенных за объектом измерения). Рассмотрим три основных варианта пространственной формы поля зрения пирометра (рис.4).

Первый вариант: приемник расположен перед фокусом или в фокусе линзовой либо зеркальной оптической системы. Поле зрения в этом случае будет представлять собой усеченный конус, расходящийся от пирометра (рис.4а). **Второй вариант,** когда приемник расположен за фокусом оптической системы. Поле зрения вначале сужается, а после прохождения "перетяжки" расширяется под углом, несколько большим угла сужения (рис.4б). **Третий случай** – когда оптическая система представляет диафрагму с калиброванным отверстием малого диаметра. Поле зрения, как и в первом случае, образует расходящийся от пирометра усеченный конус, наименьший диаметр которого равен диаметру отверстия (рис.4в).

В качестве параметра, определяющего диаметр поля зрения пирометра, обычно используют "показатель визирования" η , равный отношению диаметра поля зрения к расстоянию до точки измерения (рис.5). Следует отметить, что корректно рассчитать диаметр поля зрения пирометра на произвольном расстоянии, используя показатель визирования, можно только в случае, изображенном на рис.4в. В первом и втором вариантах (рис.4,а и 4б) такой расчет будет давать большую ошибку, так как для них $\eta=f(L)$. Наиболее точно рассчитать диаметр поля зрения возможно при использовании диаграммы поля зрения пирометра, на которой приводится диаметр (или радиус)

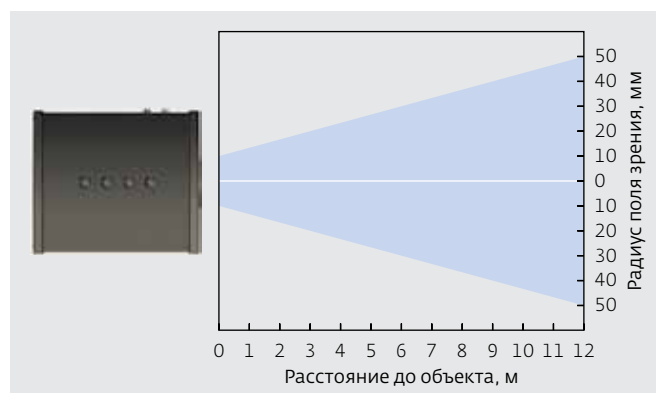


Рис.6. Диаграмма поля зрения пирометра

поля зрения в зависимости от расстояния до объекта измерения (рис.6).

Четвертое условие, влияющее на результат измерения, учет того, что пирометром может быть измерена только температура поверхности объекта. Измерение температуры внутри объекта возможно лишь путем нарушения его целостности (что справедливо и для контактных средств измерения).

Пятое условие: для настройки и поверки пирометров необходимо использовать модели АЧТ, излучательная способность которых близка к единице и определена с высокой точностью. Конструктивно модель АЧТ обычно представляет собой равномерно нагретую полость с выходным отверстием для визирования пирометра (рис.7).

Учет в реальном измерительном эксперименте на практике перечисленных факторов способен повысить точность результатов измерений температуры тел пирометром.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Криксунов Л.З.** Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978.
2. **Поскачей А.А., Чубаров Е.П.** Оптико-электронные системы измерения температуры. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
3. **Поскачей А.А., Чарихов Л.А.** Погрешности пирометров излучения и некоторые пути их снижения. – Методы и средства оптической пирометрии. М.: Наука, 1983.
4. **De Witt, Nutter.** Theory and Practice of Radiation Thermometry. – New York: John Wiley&Son, 1988.



Рис.7. Настройка и поверка пирометра по модели АЧТ



THE ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF NON-CONTACT TEMPERATURE MEASUREMENT

A.Nedelko, JSC "NPP "Etalon"

A wide variety of pyrometers offered by the market implies difficulties to make a wise choice of non-contact temperature measurement device. This article shows the advantages and disadvantages of different types of pyrometers. The major factors of measuring experiment are given affecting the accuracy of the pyrometer measurements, which is extremely important for practitioners.

If, prior the beginning of the 70's of the last century, pyrometers with disappearing filament were the main instruments for pyrometric measurements, in the recent years, thanks to the rapid development of electronic and digital technologies, a large variety of different instruments for non-contact temperature measurement of thermal radiation (pyrometers) has appeared in practice.

Therefore the question of the comparative evaluation of different types of pyrometers, the advantages and disadvantages of the pyrometric method itself is extremely relevant for practitioners. The advantages of pyrometric methods of temperature measurement over contact are known:

- High speed, determined by the type of radiation receiver and the circuit of electrical signals processing. When using



quantum detectors (photodiodes) and high-speed analog-to-digital converters (ADC), the time constant can be up to 10^{-2} – 10^{-6} sec;

- The ability to measure the temperature of moving objects and items of equipment under high voltage potential;
- No distortion of the temperature field of the object of control, which is especially important when measuring the temperature of materials with low thermal conductivity (wood, plastic, etc.), as well as the risk of damage to the surface and form in the case of soft (plastic) objects;
- The ability to measure high temperatures when use of contact measuring devices either impossible or time of their operation is very small;
- The possibility to operate under increased radiation and ambient temperature (up to 250°C) with diversity of the feeder head and the electronics of the pyrometer with the help of a fiber optic cable.

But the main dement of pyrometric temperature measurement is the difficulty of the full record-keeping of bounding between the thermodynamic temperature and thermal radiation of the object recorded by the pyrometer. The change of the surface radiation capacity ϵ depending on the wavelength λ in the recorded spectral range, and the temperature T in the range of measurement, availability of absorption in the medium between the pyrometer and the object of control, the geometric parameters of the viewing area of the pyrometer and an optical system, the ambient temperature and the temperature of the device housing should be taken into account.

What are the main factors affecting the accuracy of measurement results of the pyrometer? First, it is known that the pyrometer, measuring the flow of thermal radiation from a certain part of the surface of the object in the work area of the spectrum, calculates its temperature. Or, in the spectral ratio pyrometers, a ratio of fluxes in two or more regions of the spectrum is used.

To calculate the density of the radiation in a given spectral range Planck's law is applied, which is the main and the most common law in the theory of thermal radiation:

$$E(\lambda, T) = \frac{\epsilon \times C_1}{\lambda^5 \times \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \text{ W/cm}^3,$$

where ϵ is an emissivity, C_1 and C_2 are the first and second Planck's constants, λ - wavelength, T - temperature.

For non-transparent bodies, the expression: $\epsilon = A - R$ is valid, where A - the absorption factor, R - reflectivity factor. Object with $R = 0$ (ie, completely absorbs incident radiation), has the highest emissivity. Its $\epsilon = 1$, and it is called "absolute black body" (ABB). Real objects have an emissivity less than 1 and, therefore, emit less energy. The problem is that for most of the real objects emissivity depends on temperature and wavelength, ie $\epsilon = f(\lambda, T)$, as well as on many other factors, material and shape of the object, the surface condition, the presence of the oxide film, condensation, etc. (Fig. 1).

Wood, plastic, organic materials, stone, graphite has an emissivity of about 0,8-0,95, while the emissivity of metals, on the contrary, can vary within wide limits, depending on temperature and wavelength. The surface of the molten metal forms a smooth mirror which emissivity may be less than 0,1, and the emissivity of the floating on the surface slag can reach 0,9-0,95.

To correctly measure the temperature, emissivity of the object should be specified for the pyrometer. The following methods are used to define the temperature in modern pyrometric practice:

- Reference tables, usually given in the manual for the instrument or in the references (note that this method is the simplest and least accurate).
- Contact measuring of the object temperature (for example, with surface thermocouple). Then, changing the emissivity readings on pyrometer adjuster achieve the equality of pyrometer and thermocouple readings. If for some reason contact measurement of the object temperature is not possible, the procedure is carried out with a sample of the object material, by heating it to a temperature close to the temperature of the object. Some models of pyrometers have a thermocouple connector and can perform contact and non-contact measurement of the temperature simultaneously.
- Having drilled a hole in the object (or a sample of the material of the object) measure the temperature inside it with a pyrometer. The diameter of the hole should be relevant to the diameter of the viewing area of the pyrometer, and the depth should be five times greater than the diameter. Then emissivity of the created in this way model of an absolute black body can be taken as 1. You then need to put a pyrometer to the unbroken surface of the object, and changing the emissivity readings on pyrometer adjuster get close to those obtained previously by the blackbody model. This method is the most time consuming and is appropriate only in the case where the temperature drop along the length of the hole is small;
- At low temperatures, part of the object's surface is sometimes painted with matt black paint, the emissivity of which can be taken as 0.95. Then, measure the temperature of the painted surface with the pyrometer, and then, determine the emissivity of unpainted surfaces as described above.

Second, there should not be obstacles, opaque in the working range of the pyrometer spectrum between the pyrometer and the object. Otherwise, due to the reduction of the radiation flux pyrometer readings will be too low. Measurement object, in contrast, should be opaque in this spectral area. For example, consider an ordinary optical glass at 25°C (Fig. 2).

When it is necessary to measure the temperature of the glass, use a thermometer that works in the area of the spectrum, in which the glass is the least transparent. As it can be seen from Fig. 2 at 25°C, this area is 5-8 microns. If to make measurements with the pyrometer working in the area 1-2 microns, it will be measured the temperature not of glass but the objects behind the glass (it should be noted that the glass becomes opaque in 1-2 microns at temperatures above 1000°C).

Content of a significant amount of dust, smoke or steam in the air in front of the object reduces the accuracy of the measurements, since there is selective (in a certain range of wavelengths) or continuous weakening of the thermal radiation of the object. Selective absorption of heat radiation occurs even in an absolutely pure air due to absorption of gases in its composition (mainly CO, CO₂, H₂O), which leads to the pyrometer readings depending on the distance to the object. There is so-called "transparency window" of the atmosphere (1-1.7, 2-2.5, 3-5 and 8-14 microns), where the absorption is minimal (Fig. 3). If to use optical filters (germanium, silicon,



etc.) in the pyrometer then the error, resulting from the absorption by the atmosphere will be reduced to a minimum, provided falling into the "transparency window".

Significant errors also occur when surfaces of the pyrometer optical system are contaminated. This leads to the need for periodic cleaning or, in the most severe conditions, continuous blowing with clean air.

Third, we need to take into account the geometrical parameters of optical systems. An optical system forms the pyrometer viewing area - the region of space within which the temperature is measured. For correct measurement it's necessary that the object completely covers the field of view. Otherwise, first, the flow of heat radiation falling on the receiver (sensor) of the pyrometer from the measured object, reduces proportionally to the reduction of the area overlapped by the object. Second, the receiver will get the radiation of the background (objects located behind the object of measurement). Let's consider three main options for the spatial form of the viewing area of the pyrometer.

The first option: the receiver is located in front of or at the focus of the lens or mirror optical system. The field of view in this case will constitute a truncated cone, which diverges from the pyrometer (Fig. 4a). The second option, where the receiver is located behind the focus of the optical system. The viewing area narrows at the beginning, and then upon passing the "waist" expands with an angle slightly greater than angle of narrowing (Fig. 4b). The third option, when the optical system is a diaphragm with a small diameter orifice. The viewing area, as in the first case, makes a truncated cone

diverging from the pyrometer, the smallest diameter of which is equal to the diameter of the hole (Fig. 4c).

"Sighting index" η , equal to the ratio of the diameter of the viewing area to the distance from the point of measurement (Fig. 5) is usually used as a parameter that determines the diameter of the viewing area of the pyrometer. It should be noted that the correct calculation of the diameter of the viewing area of the pyrometer at any distance using the sighting index, is possible only in the case shown in Fig. 4c. As for the first two cases (Fig. 4a and b) such a calculation would give a big mistake, because they have $\eta = f(L)$. The most accurate calculation of the diameter of the viewing area is possible with the pyrometer viewing area diagram, which shows the diameter (or radius) of the viewing area depending on the distance to the measurement object (Figure 6).

The fourth factor, which affects the result of the measurement is that the pyrometer can measure only the surface temperature of the object. Measuring temperature inside the object is possible only by violating the integrity (which is also true for contact measurement tools).

And the fifth condition. Use the absolute black body models which emissivity is close to 1 and determined with a high degree of accuracy for configuration and calibration of pyrometers. By construction blackbody model is usually a uniformly heated cavity with an outlet for pyrometer sighting (Fig. 7).

In practice accounting of above mentioned factors can improve the accuracy of body temperature measurements with a pyrometer for real-measuring experiment. ■