

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПЕРВИЧНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ (ДАТЧИКИ)

УДК 536.50

В качестве основного критерия точного измерения температуры ряд авторов (см., например, [1]) принимает равенство температур чувствительного элемента термометра и исследуемой среды.

Этот критерий физически является достаточно строгим, однако выражает всего лишь пожелание, так как не учитывает возможности реализации условий, при которых он выполнен на практике. Таким образом, указанный критерий неприменим для некоторых типов термометров, которые не могут достигать температуры исследуемой среды, но тем не менее с успехом используются. В качестве примера можно назвать радиационные и конвекционные термометры [2, 3].

Условия выполнения данного критерия не удается осуществить даже в случае классического контактного измерения температуры. В самом деле, термометр является инородным телом, частично выходящим за пределы исследуемого температурного поля, поэтому его установившаяся температура неизбежно будет отличаться от измеряемой.

Указанная разность температур обусловлена рядом причин. Первая из них заключается в невозможности точечного измерения температуры. Поэтому строгое определение места измерения и измеряемой величины оказывается недостижимым. Вторая причина состоит в том, что термометр находится в радиационном и конвективном взаимодействии с более холодными или более горячими стенками, окружающими «точку» измерения. Третья причина вызывается взаимодействием между термометром и движущейся средой, при котором на его поверхности происходит превращение кинетической энергии в тепловую. Подобное взаимодействие имеет место, например, при наличии градиента температуры на поверхности термометра из-за трения и т. п.

Основной критерий точного измерения температуры должен включать объективные количественные признаки, позволяющие оценить величину статической погрешности. При этом можно в первом приближении пренебречь погрешностью от мешающего взаимодействия между термометром и исследуемой средой и ограничиться учетом взаимодействия его с нерабочей окружающей средой, например, со стенками. Такое упрощение является допустимым, если измерение производится в потоке жидкости малой вязкости при не очень больших скоростях.

Недостатки существующей методики еще более заметны при ка-

либровке термометров. Для сравнительно низких температур, где еще употребляются стеклянные термометры, имеются эмпирические сведения о рекомендуемой глубине погружения, температуре окружающей среды и условиях обтекания. При более высоких температурах употребляются металлические термометры, как правило, с охранными трубками. В этом случае становится несправедливой методика, применяемая при измерении с помощью стеклянных термометров, и отсутствует какая-либо иная. Кроме того, существуют некоторые типы термометров, например поверхностные, у которых понятие глубины погружения не имеет смысла. На основании изложенного выше становится очевидной необходимость выработки нового критерия для характеристики тепловых свойств термометра.

ТЕПЛОВАЯ СВЯЗЬ ТЕРМОМЕТРОВ

Для достижения указанных целей требуются количественные данные об условиях тепловой связи термометров с окружающей средой. Мы не касаемся измерений посредством пирометров, основанных на использовании явлений температурного излучения тел.

Иллюстрацией одновременной тепловой связи термометра с объектом измерения и окружающей средой могут служить рис. 1 и 2. На рис. 1 показан контактный термометр, а на рис. 2 — бесконтактный (конвекционный или радиационный) термометр. Уравнение энергии в режиме установившегося теплового равновесия термометра первого или второго типа имеет вид

$$k_1(t_n - t_s) = k_2(t_s - t_c), \quad (1)$$

где t_n , t_s , t_c — соответственно температура объекта измерения, чувствительного элемента и окружающей среды, а k_1 и k_2 — тепловые проводимости между чувствительным элементом, с одной стороны, объектом измерения и окружающей средой — с другой. Вопросы определения тепловых проводимостей рассматриваются, например, в [4].

Из уравнения (1) следует

$$t_s = \frac{k_1 t_n + k_2 t_c}{k_1 + k_2} = A t_n + B t_c. \quad (2)$$

Коэффициенты A и B выражают тепловую связь чувствительного элемента с объектом измерения и окружающей средой и характеризуются следующим равенством:

$$A + B = 1. \quad (3)$$

На основании (2) и (3) можно предварительно определить величину отклонения измеренной термометром температуры от действительной

$$t_n - t_s = B(t_n - t_c).$$

Из полученной зависимости ясно, что описанный в литературе основной критерий точного измерения температуры может быть реализован

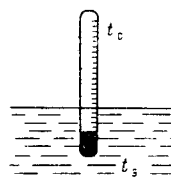


Рис. 1.

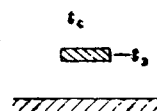


Рис. 2.

лишь в случае, когда либо $B=0$, либо $t_n \equiv t_c$. Обеспечить $B=0$ практически невозможно. Равенство между t_n и t_c наступает, если термометр полностью погружается в исследуемую среду. Полное погружение контактных термометров в большинстве случаев не представляется возможным из-за необходимости снимать показания, наличия охраняемых трубок и по другим причинам, а в случае поверхностных термометров — из-за наличия соединительных проводов или измерения температуры только на одной стороне поверхности.

Из сказанного видно, что при заданных t_n, t_c и учете характерного для термометра параметра B разность $t_n - t_s$ можно оценить численно.

ТЕРМОМЕТРЫ НЕПЛОТНОЙ ТЕПЛОВОЙ СВЯЗИ

Как будет показано далее, полученная зависимость позволяет расширить понятие измерения температуры и для тех случаев, когда $t_s \neq t_n$, т. е. когда нельзя пренебрегать разностью $t_n - t_s$.

В дальнейшем под термометрами плотной тепловой связи подразумеваются те, для которых справедливо неравенство

$$|t_n - t_s| < |\Delta t|_{\text{доп}},$$

где $|\Delta t|_{\text{доп}}$ — допустимая погрешность отклонения температуры чувствительного элемента от измеряемой.

Термометрами неплотной тепловой связи назовем те, у которых знак неравенства противоположный. Примерами таких термометров могут служить бесконтактные конвекционные термометры [2] или обычные термометры с охранной трубкой, располагаемые в неподвижных газах или в газах с малой скоростью потока.

Если в ходе измерений выяснится, что используемый термометр находится в неплотной связи со средой, то нужно стремиться к выполнению следующих условий: а) коэффициент B в процессе измерения должен быть независимым от времени; б) калибровка термометра должна осуществляться на модели теплового подобия, позволяющей получить условия измерения, аналогичные заводским.

Модели для осуществления полного теплового подобия [5, 6] значительно повышают расходы на проведение измерений, поэтому в каждом конкретном случае следует выяснить, насколько допустима замена полного подобия локальным. Возможность такой замены следует из того, что об измерении температуры можно говорить лишь в локальном смысле, так как чувствительный элемент термометра воспринимает воздействие только небольшой зоны вокруг него, а не обширного температурного поля. Таким образом, допустимо моделирование локального теплового подобия.

Условия локального подобия могут быть выведены из системы дифференциальных уравнений, описывающей температурное поле, например, при помощи расчета возмущений, рассмотренного в [7]. Другие методы, устанавливающие условия частичного подобия, излагаются в [8].

Принцип частичного теплового подобия известен в термометрии. Так, например, употребление абсолютно черного тела для градуировки радиационных пирометров и последующее измерение ими температуры объектов с меньшей энергией полного излучения можно рассматривать как осуществление частичного теплового подобия. Поэтому не является

ся исключительным то обстоятельство, что употребление моделей оказывается необходимым условием измерения или калибровки в случае применения термометров неплотной тепловой связи.

ВЫВОДЫ

Показано, что чувствительные элементы термометров не могут точно принимать температуру исследуемой среды. Существующий в настоящее время основной критерий точного измерения температуры не является удовлетворительным и достаточно общим для современной термометрии.

Предложен новый критерий, который при небольших скоростях потока позволяет установить, в какой мере была достигнута термометром измеряемая температура, а также выяснить характер тепловой связи между термометром и средой.

Калибровка термометров неплотной тепловой связи требует моделирования теплового процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. Henning. Temperaturmessung. Barth Leipzig, 1955.
2. A. Haas. Ambient Temperature Compensated Non Contacting Surface Thermometer.— Acta IMEKO, 1964, 23—HU—105.
3. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений. Киев, Гостехиздат УССР, 1953.
4. A. Haas. Stationary Temperature Distribution in Thermometer Protecting Tubes.— Acta Technica Hungaricae. 1965, m. 51, pp. 291—308.
5. Л. С. Эйгенсон. Моделирование. М., «Сов. наука», 1949.
6. Н. В. Кирпичев. Теория подобия. М., Изд-во АН СССР, 1953.
7. A. Haas. The Local Similarity of Perturbed Fields.— Acta Technica Hungaricae, 1963, т. 44, Fasc 3—4.
8. S. J. Kline. Similitude and Approximation Theory. Mc Graw Hill, 1965.

*Поступила в редакцию
20 июля 1966 г.*