

**АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ИЗМЕРЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ТВЕРДЫХ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
МЕТОДОМ ПЛОСКОГО «МГНОВЕННОГО»
ИСТОЧНИКА ТЕПЛОТЫ**

А.В. Гуров, С.В. Пономарев

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор С.В. Мищенко

Ключевые слова и фразы: измерение; измерительное устройство; источники погрешностей; метод; проектирование и разработка; теплоизоляционные материалы; теплофизические свойства.

Аннотация: Рассмотрены перечень, результаты анализа и рекомендации по преодолению негативных последствий источников (причин) погрешностей измерения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов с использованием метода плоского «мгновенного» источника теплоты. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании, разработке и выборе оптимальных режимных параметров метода и конструкционных размеров измерительного устройства.

Введение

Результаты измерения температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости теплоизоляционных и теплозащитных материалов, полученные с применением метода плоского «мгновенного» источника теплоты, всегда содержат погрешности, составляющие которых обусловлены различными причинами и явлениями.

Для того чтобы правильно сконструировать и изготовить измерительное устройство, а затем успешно осуществить экспериментальное измерение теплофизических свойств в соответствии с проектируемым (разрабатываемым) методом, необходимо знать и понимать все причины и источники погрешностей измерения теплопроводности.

Гуров Андрей Викторович – старший преподаватель ФГБОУ ВПО «Воронежский институт ГПС МЧС России»; Пономарев Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, и. о. заведующего кафедрой «Управление качеством и сертификация», e-mail: kafedra@uks. tstu.ru, ТамбГТУ, г. Тамбов.

Ниже рассмотрены основные источники, причины и явления, вносящие вклад в результирующую погрешность измерения температуропроводности, теплопроводности и объемной теплоемкости твердых теплоизоляционных и теплозащитных материалов. Приведенные ниже результаты анализа изложены в соответствии с рекомендациями мнемонического приема «4М, ..., 6М», используемого в теории управления качеством при классификации (стратификации, группировке, расслаиваний) причин несоответствий [1].

1. Анализ источников погрешностей, обусловленных неполным выполнением допущений, принятых при разработке математической модели используемого метода и измерительной ячейки

Математическая модель метода плоского «мгновенного» источника теплоты включает в себя [2–4] дифференциальное уравнение Фурье

$$c\rho \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right] + Q_n \delta(\tau) \delta(x), \quad \tau > 0, \quad -\infty < x < +\infty, \quad (1)$$

в правой части которого записан источник теплоты, действовавший в момент времени $\tau = 0$ в плоскости с координатой $x = 0$, с начальным условием

$$T(x, 0) = T_0 = 0; \quad (2)$$

и с граничными условиями

$$T(-\infty, \tau) = T(+\infty, \tau) = T_0 = 0, \quad (3)$$

где $T(x, \tau)$ – температура в точке с координатой x в момент времени τ ; c, ρ, λ – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность исследуемого вещества; T_0 – начальная температура вещества, принимаемая за начало температурной шкалы данного эксперимента, $T_0 = 0$; Q_n – количество тепла, выделившееся в единице поверхности плоского нагревателя, Дж/м²; $\delta(\tau), \delta(x)$ – символические дельта-функции Дирака [2–5].

В статье [6] математическими методами получены расчетные формулы для вычисления искомым теплофизических свойств по результатам проведения эксперимента, обеспечивающие минимизацию погрешностей измерений, имеющие вид:

$$a = \frac{x_0^2}{4z'\tau'}, \quad (4)$$

$$c\rho = \frac{Q_n}{[T_{\max} - T_0]x_0\sqrt{2\pi e}}, \quad (5)$$

где $a, c\rho$ – температуропроводность и объемная теплоемкость материалов; x_0 – координата поверхности, в которой производится измерение температуры $T(x_0, \tau)$; τ' – момент времени, в который достигается заданное значение параметра

$$\beta = \frac{T(x_0, \tau') - T_0}{T_{\max} - T_0}; \quad (6)$$

T_{\max} – максимальное значение температуры $T(x_0, \tau)$, достигаемое в процессе эксперимента; z' – большее по величине значение корня уравнения

$$\sqrt{z} \exp(-z) = \beta / \sqrt{2e}. \quad (7)$$

Отметим, что после определения значений a и $ср$, теплопроводность вычисляется по формуле

$$\lambda = a ср. \quad (8)$$

Рассмотрим подробнее причины (источники) возникновения погрешностей измерения теплофизических свойств теплоизоляционных и теплозащитных материалов методом плоского «мгновенного» источника теплоты, теоретические основы которого приведены в статье [6].

1.1. Снижение влияния источников погрешностей, обусловленных неполным выполнением допущений, принятых при записи правой части дифференцированного уравнения теплопроводности Фурье в виде функции $Q_n \delta(x) \delta(\tau)$

Запись правой части уравнения теплопроводности в краевой задаче (1) – (3) в виде функции $Q_n \delta(x) \delta(\tau)$ основана на допущениях, что в начальный момент $\tau = 0$ активной стадии эксперимента в единице площади плоскости $x = 0$ внутри исследуемого материала должно выделиться конечное количество теплоты Q_n , Дж/м². При практическом осуществлении разработанного метода: 1) источник теплоты выполняют в виде тонкого электрического нагревателя, имеющего малую, но конечную (не нулевую) толщину Δ ; 2) выделение заданного количества теплоты Q_n в единице площади этого нагревателя в реальности происходит в течение конечного промежутка времени $0 < \tau < \tau_n$, где τ_n – длительность импульса.

Для преодоления негативных последствий неполного выполнения рассматриваемых допущений необходимо предусматривать:

– толщина Δ используемого нагревателя должна быть намного меньше расстояния x_0 от нагревателя, размещенного при $x = 0$, до плоскости с координатой $x = x_0$, в которой установлен первичный измерительный преобразователь (ПИИ) температуры, то есть необходимо выполнить условие $\Delta = (0,02 \dots 0,05)x_0$;

– длительность τ_n теплового импульса должна быть много меньше значения момента времени τ_{\max} , в который достигается максимальное значение температуры $T_{\max} = T(x_0, \tau_{\max})$ в плоскости с координатой $x = x_0$, а именно, должно быть $\tau_n = (0,04 \dots 0,1)\tau_{\max}$.

При практическом осуществлении эксперимента (для уменьшения результирующих погрешностей измерения α , λ , $ср$) следует использовать рекомендации по введению поправок на конечную длительность τ_n теплового импульса, изложенные в [2–4, 7]. Введение таких поправок в виде функций $\varphi_\alpha\left(\frac{\tau_n}{\tau_{\max}}\right)$, $\varphi_\lambda\left(\frac{\tau_n}{\tau_{\max}}\right)$, $\varphi_{ср}\left(\frac{\tau_n}{\tau_{\max}}\right)$ впервые было предложено в работах академика А.Г. Шашкова [7].

1.2. Снижение влияния источников погрешностей, обусловленных неполным выполнением допущений о неограниченности $-\infty < x < +\infty$ образца исследуемого материала и о задании граничных условий

$$T(-\infty, \tau) = T(+\infty, \tau) = T_0 = 0 \text{ при } x = \pm\infty$$

Постановка краевой задачи (1) – (3) предполагает, что образец имеет достаточно большие размеры $-L < x < x_0 < L$, позволяющие считать, что $L \rightarrow +\infty$ и $-L \rightarrow -\infty$. Для того чтобы рассматриваемое допущение не приводило к значительным погрешностям измерений (как показали проведенные исследования), при изготовлении (подготовке) исследуемого образца следует обеспечить выполнение требования $x_0 \leq 0,1L$ (или $2L \geq 20x_0$), то есть общая толщина $2L$ используемого образца должна быть не менее чем в двадцать раз больше расстояния x_0 от плоскости размещения нагревателя до плоскости установки ПИП температуры.

Заданные в краевой задаче (1) – (3) граничные условия $T(-\infty, \tau) = T(+\infty, \tau) = T_0 = 0$ могут считаться выполненными с достаточной степенью точности как за счет выполнения требования $x_0 \leq 0,1L$ ($2L \geq 20x_0$), так и за счет использования легкоосъемной изоляции, защищающей внешние поверхности исследуемого образца при $x = -L$ и $x = +L$.

1.3. Снижение влияния источника погрешностей, обусловленного неполным достижением стационарного режима работы измерительной установки при подготовке к проведению активной стадии эксперимента

Математическая модель (1) – (3) предполагает, что контролируемая в процессе эксперимента температура $T(x, \tau)$ в момент $\tau = 0$ начала активной стадии эксперимента должна быть постоянной, одинаковой во всех точках исследуемого образца $T(x, 0) = T_0 = 0$, как это определено в начальном условии (2). Таким образом, температура $T(x, 0)$ непосредственно перед моментом начала активной стадии эксперимента, должна быть строго постоянной (неизменной) во времени, что возможно только при достижении полностью установившегося (стационарного) режима работы измерительной установки в конце подготовительной стадии.

Для уменьшения влияния этого источника погрешностей на протяжении подготовительной стадии необходимо контролировать изменение во времени значений температуры $T_i^n = T^n(x_0, \tau_i)$, $i = 1, 2, \dots, k$, а регистрацию начального (для активной стадии эксперимента) значения температуры $T(x_0, 0)$ следует осуществлять только после того, когда будет достигнута полная уверенность в том, что желаемый стационарный режим работы экспериментальной установки на подготовительной стадии достигнут с допустимой погрешностью. При этом, в качестве $T(x_0, 0)$ принимается последнее значение $T(x_0, 0) = T^n(x_0, \tau_k)$, зарегистрированное в конце подготовительной стадии. О достижении стационарного режима работы можно судить, например, по динамическому критерию E_T вида

$$E_T = \frac{\Delta\tau}{T^n - T_0^n} \frac{dT^n}{d\tau} \approx \frac{T_i^n - T_{i-1}^n}{T_i^n - T_0^n} \leq \varepsilon_T,$$

где $\Delta\tau$ – величина шага измерения во времени значений температуры T_i^n ; ε_T – допустимая погрешность достижения стационарного значения темпе-

ратуры T_i^n ; T_i^n , T_{i-1}^n , T_0^n – значения температуры на i -м и на $(i-1)$ -м и на нулевом шагах измерения на подготовленной стадии.

Для повышения надежности контроля наступления стационарного режима работы экспериментальной установки динамический критерий E_T может быть представлен в виде

$$E_T = \frac{T_i^n - T_{i-n}^n}{T_i^n - T_0^n} \leq \varepsilon_T,$$

где T_i^n , T_{i-n}^n – значения температур на i -м и на $(i-n)$ -м шагах измерения (отстоящих друг от друга на постоянное число n шагов измерения).

Если величина шага измерения Δt во времени достаточно велика, то число n может быть задано относительно небольшим $n = 2 \dots 5$, а при малой величине шага Δt иногда приходится задавать большое значение числа n .

1.4. Снижение влияния источников погрешностей измерений из-за невыполнения допущений об однородном начальном распределении температуры $T(x,0) = T_0 = 0$ в образце в момент начала активной стадии эксперимента

Используемое в краевой задаче (1) – (3) начальное условие (2) может быть с достаточной точностью выполнено:

1) за счет длительного выдерживания исследуемого образца при постоянной температуре T^n на протяжении подготовительной стадии эксперимента;

2) за счет контроля значения динамического параметра

$$E_T = \frac{T_i^n - T_{i-n}^n}{T_i^n - T_0^n} \leq \varepsilon_T \text{ до достижения наперед заданной малой величины } \varepsilon_T.$$

Выполнение этих условий обеспечивает приемлемые величины составляющих результирующих относительных погрешностей δ_a , δ_λ , δ_{c_p} измерения искомым теплофизических свойств a , λ , c_p , обусловленные рассматриваемыми в данном п. 1.4 источниками (причинами) погрешностей.

1.5. Снижение влияния источников погрешностей, обусловленных невыполнением допущения об однородном (равномерном) распределении количества теплоты Q_n по поверхности плоского нагревателя во время действия плоского «мгновенного» источника теплоты

Для выполнения этого допущения при изготовлении электрического нагревателя следует обеспечить равномерное распределение электрического сопротивления по поверхности этого нагревателя.

Это требование может быть выполнено при изготовлении электрического нагревателя:

1) путем размещения на тонкой плоской подложке проволочных элементов в электрической изоляции, равномерно установленных относительно друг друга на поверхности этой подложки;

2) путем изготовления (вырезания) плоского нагревателя из тонкого металлического (например, пермаллового) листа или фольги постоянной

толщины таким образом, чтобы все элементы такого нагревателя имели одинаковое электрическое сопротивление.

В этом случае при пропускании электрического тока через нагреватель в каждом его элементе выделяется одинаковое количество теплоты, что позволяет считать рассматриваемое допущение выполненным.

1.6. Снижение влияния источников погрешностей, обусловленных неполным выполнением допущений о возможности пренебречь геометрическими размерами и теплофизическими свойствами электрического нагревателя и первичного измерительного преобразователя температуры

Для выполнения этих допущений толщина электрического нагревателя и поперечный геометрический размер используемого ПИП температуры должны быть как можно меньше. Проведенные исследования позволяют сформулировать следующие рекомендации:

– электрический нагреватель следует изготавливать из пермаллового листа толщиной 0,05...0,1 мм;

– в качестве ПИП температуры лучше всего использовать термопару, например типа хромель-копель, изготовленную методом конденсаторной сварки встык из проволочек диаметром $\approx 0,1$ мм.

Таким образом, выполнение изложенных выше рекомендаций позволяет считать, что допущения, положенные в основу используемой математической модели (1) – (3), выполнены с достаточной для практических потребностей точностью, что подтверждается проведенными экспериментальными исследованиями изготовленного макета измерительного устройства, реализующего метод плоского «мгновенного» источника теплоты.

2. Анализ источников погрешностей, обусловленных ошибками при осуществлении метода плоского «мгновенного» источника теплоты

2.1. Снижение влияния источников погрешностей определения искомых теплофизических свойств, обусловленных погрешностями измерений значений момента времени τ_{\max} , соответствующего достижению максимальной температуры $T_{\max} = T(x_0, \tau_{\max})$

В статье [6] показано, что определение момента времени τ_{\max} , соответствующего достижению максимальной температуры $T_{\max} = T(x_0, \tau_{\max})$ в ходе эксперимента, всегда связано с большими относительными погрешностями, достигающими величины $\delta\tau_{\max} = 15...20\%$. В связи с этим в статье [6] предложено вместо измерения величины τ_{\max} перейти к определению (и использованию при обработке экспериментальных данных) значения момента времени $\tau'(\beta)$, соответствующего достижению заданной величины безразмерного параметра $\beta = \frac{T(x_0, \tau') - T_0}{T_{\max} - T_0}$, значение которого легко контролировать в процессе осуществления метода. В статье [6] показано, что величину безразмерного параметра β следует выбирать из диапазона $0,3 \leq \beta \leq 0,65$, причем оптимальное значение этого параметра $\beta_{\text{опт}} = 0,48$.

Переход к измерению значения $\tau'(\beta)$ при значениях $\beta \approx \beta_{\text{опт}} = 0,48$ позволяет существенно уменьшить результирующие погрешности δ_a , δ_λ , $\delta_{\text{ср}}$ определения теплофизических свойств a , λ , ср по сравнению со случаем измерения момента времени τ_{max} .

2.2. Снижение влияния источников погрешностей, обусловленных наличием неоднородностей и тепловых сопротивлений в образце исследуемого материала

В основу разработанного нами метода плоского «мгновенного» источника теплоты положены допущения о том, что образец исследуемого материала является однородным, изотропным и в нем отсутствуют локальные тепловые сопротивления. Однако, внедрение в образец плоского электрического нагревателя при $x = 0$ и ПИП температуры (термопары) при $x = x_0$ обуславливает определенные неоднородности внутри исследуемого материала. Кроме того, в местах контакта трех составных элементов образца возникают тепловые сопротивления, также искажающие температурное поле внутри образца.

Для преодоления этих источников погрешности следует рекомендовать:

- при изготовлении составных частей образца необходимо следить, чтобы в этих подготовленных составных частях не было видимых неоднородностей; при выявлении признаков неоднородностей (особенно в центральном элементе толщиной x_0) следует изготовить новые элементы;
- для предотвращения появления тепловых контактных сопротивлений внутри многослойного образца необходимо изготавливать поверхности трех элементов образца, контактирующие между собой (а также с нагревателем и термопарой) с учетом недопустимости отклонения формы этих поверхностей от плоскости;
- осуществлять тщательную обработку поверхностей с целью уменьшения микрошероховатостей и макронеровностей путем шлифовки, полировки и притирки поверхностей образцов на специальных приспособлениях [2];
- предотвращать загрязнения контактных поверхностей, способных привести к возрастанию контактных тепловых сопротивлений [2];
- использовать специальные прижимающие устройства с постоянным усилием, способствующие существенному снижению влияния контактных тепловых сопротивлений [4];
- если позволяет исследуемый материал, то необходимо применять сухие или мокрые смазки, способствующие уменьшению контактных тепловых сопротивлений [2–4].

2.3. Снижение влияния источников погрешностей, обусловленных изменением температуры внешних поверхностей исследуемого образца в процессе эксперимента

Из-за изменения температуры окружающей среды возможно возникновение дополнительных погрешностей измерения искомых теплофизических свойств. Для преодоления негативных последствий этих источников погрешностей следует рекомендовать:

- для защиты внешних поверхностей исследуемого образца в конструкцию измерительной ячейки ввести легкоосъемную тепловую изоляцию;
- для дополнительной защиты образца от внешних тепловых воздействий использовать размещение измерительной ячейки в небольшом воздушном термостате, обеспечивающем поддержание постоянной температуры воздуха вокруг легкоосъемной тепловой изоляции.

2.4. Снижение влияния источников погрешностей, вызванных упущениями в работе персонала при осуществлении метода измерения

При практическом осуществлении метода возможно появление дополнительных источников погрешностей, вызванных ошибками оператора, например:

- 1) при изготовлении составных частей образца и их размещении в измерительной ячейке при подготовке эксперимента;
- 2) установке нагревателя и первичного измерительного преобразователя температуры (термопары) между составными частями образца;
- 3) применении недопустимых сухих или мокрых смазок, используемых для снижения контактных тепловых сопротивлений;
- 4) вводе неверных исходных данных в компьютер, управляющий ходом эксперимента и осуществляющий обработку полученных экспериментальных данных;
- 5) неправильном подключении используемых средств измерений к интерфейсу компьютера и др.

Для преодоления негативных последствий таких источников погрешностей на начальных этапах использования метода плоского «мгновенного» источника теплоты следует осуществить обучение оператора теоретическим и практическим основам использования этого метода, а затем провести тренировки оператора по осуществлению всех необходимых операций и действий на рабочем месте. В дальнейшем можно рекомендовать осуществление периодического контроля правильности действий оператора при выполнении всех видов работ на измерительной установке.

3. Анализ источников погрешностей определения искомых теплофизических свойств, обусловленных неточным измерением физических величин, входящих в расчетные формулы

Из полученных в статье [6] формул для вычисления относительных погрешностей δ_a , $\delta_{ср}$ определения искомых теплофизических свойств a и $ср$ следует, что эти результирующие погрешности δ_a , $\delta_{ср}$ зависят от абсолютных ΔT_0 , ΔT_{\max} , $\Delta T(x_0, \tau')$, $\Delta Q_{п}$, Δx_0 , $\Delta \tau'$ и относительных δT_0 , δT_{\max} , $\delta T(x_0, \tau')$, $\delta Q_{п}$, δx_0 , $\delta \tau'$ погрешностей непосредственно измеряемых физических величин T_0 , T_{\max} , $T(x_0, \tau')$, $Q_{п}$, x_0 , τ' .

Очевидно, что для снижения результирующих погрешностей δ_a , $\delta_{ср}$ определения искомых теплофизических свойств a и $ср$, следует принять меры для уменьшения абсолютных и относительных погрешностей непо-

средственно измеряемых физических величин T_0 , T_{\max} , $T(x_0, \tau')$, $Q_{\text{п}}$, x_0 , τ' , что может быть достигнуто за счет [2–4]:

1) снижения погрешностей используемых ПИП, например, путем замены имеющихся на более точные [4];

2) использования методов статической обработки результатов многократных измерений непосредственно измеряемых физических величин, что позволяет существенно повысить точность результатов измерений за счет снижения действия случайных помех и шумов [4];

3) применения аппаратных средств, снижающих влияние внешних наводок и шумов, например, использование электрических экранов, установка фильтров, устраняющих влияние внешних электромагнитных наводок переменного тока во входных цепях используемых приборов и во входных каналах информационно-измерительной системы [4];

4) использования рациональных измерительных схем и выбора оптимального варианта организации процесса измерения, позволяющих дополнительно уменьшить влияние погрешностей непосредственно измеряемых физических величин на конечный результат определения искомых теплофизических свойств [4], например, путем замены измерения величины τ_{\max} (с погрешностью $\delta = 10 \dots 20 \%$) на определение величины τ' , осуществляемое со значительно меньшей погрешностью $\delta\tau' = 0,5 \dots 2 \%$.

Заключение

Выполнение изложенных в статье рекомендаций по снижению влияния трех групп источников погрешностей:

1) обусловленных неполным выполнением допущений, принятых при разработке математической модели (1) – (3) метода плоского «мгновенного» источника теплоты;

2) связанных с ошибками, допущенными при осуществлении измерительных операций используемого метода плоского «мгновенного» источника теплоты;

3) вызванных неточным определением значений физических величин, непосредственно измеряемых в ходе эксперимента, позволяет (уже на этапе проектирования и разработки измерительных операций метода плоского «мгновенного» источника теплоты и конструкции измерительной ячейки) принять меры по устранению негативного влияния этих источников погрешностей, в том числе, способствует правильному выбору оптимальных режимных параметров процесса измерения и определению рациональных конструкционных размеров измерительного устройства.

Список литературы

1. Управление качеством процессов и продукции. В 3 кн. Кн. 1 : Введение в системы менеджмента качества процессов в производственной, коммерческой и образовательной сферах : учеб. пособие / С.В. Пономарев, [и др.] ; под ред. д-ра техн. наук, проф. С.В. Пономарева. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 240 с.

2. Теоретические и практические основы теплофизических измерений / С.В. Пономарев [и др.] ; под ред. С.В. Пономарева. – М. : Физматлит, 2008. – 408 с.

3. Пономарев, С.В., Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография. В 2 кн. Кн.1 / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. – 204 с.

4. Пономарев, С.В. Теоретические и практические аспекты теплофизических измерений : монография. В 2 кн. Кн. 2 / С.В. Пономарев, С.В. Мищенко, А.Г. Дивин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006.– 216 с.

5. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973. – 832 с.

6. Гуров, А.В. Выбор оптимальных условий измерения теплофизических свойств веществ методом плоского «мгновенного» источника тепла / А.В. Гуров, Г.А. Соседов, С.В. Пономарев // Измер. техника. – 2012. – № 10. – С. 47–49.

7. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А.Г. Шашков [и др.]. – М. : Энергия, 1973. – 336 с.

Analysis of Errors Sources in Measurements of Thermo-Physical Properties of Solid Heat-Insulating Materials by Plate “Instant” Heat Source Method

A.V. Gurov, S.V. Ponomarev

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and Phrases: analysis; design and development; error sources; heat-insulating material; measurements; measuring device; method; thermo-physical properties.

Abstract: The paper analyzes the error sources of measuring thermo-physical properties of heat-insulating materials; the recommendations on overcoming the negative error sources through plate “instant” heat source method have been made. The produced results may be used to design and develop optimal mode parameters of the method and rational construction geometrical sizes of a measuring device.

© А.В. Гуров, С.В. Пономарев, 2013