

## О ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ В КОНДУКТИВНОМ БОМБОВОМ КАЛОРИМЕТРЕ

Л.И. Воробьев, Т.Г. Грищенко, Л.В. Декуша

*Институт технической теплофизики НАН Украины*

*Представлена членом редколлегии профессором С.В. Мищенко,  
членом редколлегии спецвыпуска профессором А.А. Чуриковым*

**Ключевые слова и фразы:** кондуктивный калориметр; теплота сгорания; калориметрическая бомба; погрешность измерения; теплофизические измерения.

**Аннотация:** Экспериментально исследовано распределение температур на поверхности калориметрической бомбы при сжигании проб различных видов топлива. Проведено моделирование пространственной неравномерности тепловых полей в кондуктивном бомбовом калориметре и исследована соответствующая составляющая погрешности измерения.

### Обозначения

$C_{КБ}, C_g$ - полная теплоемкость бомбы и теплоемкость $g$ -го элемента, Дж/К;	$S, S_i, \Delta S_i$ - средняя чувствительность к проходящей энергии элемента ТО, чувствительность $i$ -го элемента и отклонение чувствительности $i$ -го элемента от среднего значения, В/Дж;
$D(\delta_{ПН}), D(\Delta S/S)$ - дисперсии относительной погрешности и отклонений чувствительности;	$x$ - относительная координата по высоте;
$n_z$ - количество элементов разбиения поверхности ТО;	$t$ - время;
$Q_{П}, Q_g$ - полная энергия сгорания пробы и энергия, переданная $g$ -тому элементу бомбы, Дж;	$\Delta Q_{i,1}, \Delta Q_{i,2}$ - отклонения от среднего значения энергии, проходящей через $i$ -ый элемент при градуировке и при реальных измерениях, Дж;
$Q_{изм,1}, Q_{изм,2}$ - измеренные значения энергии сгорания при градуировке и при реальных измерениях, Дж;	$\Delta T_{СР}, \Delta T_g$ - среднее приращение температуры бомбы и приращение температуры $g$ -того элемента, К;
$Q_{СР}$ - средняя энергия, проходящая через элемент разбиения поверхности ТО, Дж;	$\delta_{ПН}$ - относительная погрешность измерения из-за пространственной неоднородности;
	ТО - теплотметрическая оболочка.

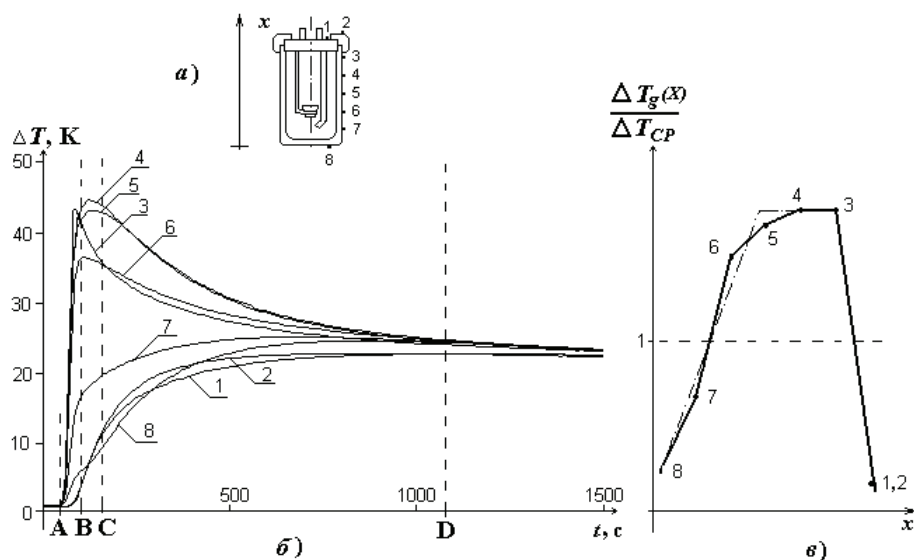
Приборы для определения теплоты сгорания топлива типа КТС, разработанные в Институте технической теплофизики НАН Украины, по принципу действия являются кондуктивными бомбовыми изопериболическими калориметрами [1, 2, 3]. Теплота, выделяемая при сгорании пробы топлива в калориметрической бомбе, отводится к изотермической оболочке через термоэлектрический преобразователь теплового потока, выполненный в виде цилиндрической вспомогательной стенки - теплотметрической оболочки (ТО). Сигнал ТО пропорционален проходящей через него тепловой мощности. До начала измерений в тепловом блоке калориметра должен установиться стационарный режим, т.е. должны быть стабилизированы температуры всех внутренних элементов. Затем производят поджог пробы топлива и с помощью электронного блока интегрируют сигнал ТО до восстановления стационарного режима в тепловом блоке.

Характер пространственного распределения тепловых потоков и температур при сгорании пробы в калориметрической бомбе существенно зависит от вида исследуемого топлива. При исследовании горючих газов в калориметрической бомбе процесс

сгорания имеет гомогенный характер и распределение тепловых потоков по внутренней поверхности бомбы равномерно. При исследовании твердых и жидких топлив - процесс горения гетерогенный, распределение тепловых потоков - неравномерное.

Проведены экспериментальные исследования распределения температур на поверхности стандартной калориметрической бомбы типа ЛБС-1 при сжигании таблетированной пробы бензойной кислоты массой около 1 г. Температуры измерялись с помощью ленточных хромель-алюмелевых термопар, спаи которых размещались на поверхности бомбы, как показано на рис. 1, а.

Термопара 1 размещена на крышке, термопара 2 - на гайке, термопары 3÷7 - по образующей цилиндрического стакана, а термопара 8 - на дне бомбы. Для уменьшения теплообмена с окружающей средой при эксперименте бомба была покрыта слоем поролоновой теплоизоляции. Графики изменения приращения температуры при сжигании пробы твердого топлива представлены на рис. 1, б. По графикам можно проследить закономерности теплообмена в калориметрической бомбе. В момент времени А происходит поджог пробы и начинается быстрое нарастание температуры в верхней части стакана (кривые 3÷6). Температура дна и нижней части стакана (кривые 7 и 8) нарастает значительно медленней вследствие того, что на эти участки попадает меньшая доля энергии от факела пламени. Температуры поверхности крышки бомбы и гайки (кривые 1 и 2) медленно нарастают вследствие большой толщины и теплоемкости этих деталей.



**Рис. 1 Экспериментальные исследования распределения температур на поверхности калориметрической бомбы:**

а) размещение термопар 1÷8 на поверхности КБ; б) графики изменения приращения температуры при сжигании пробы твердого топлива; в) распределение относительной температуры по высоте бомбы непосредственно после сгорания пробы

В момент времени В (через 25÷30 с после поджога) проба догорает, рост температуры на участках поверхности бомбы прекращается или замедляется. На интервале времени ВС происходит выравнивание температуры по толщине стенок бомбы и начинается выравнивание температур различных частей бомбы.

На интервале времени CD температуры верхней части стакана бомбы понижаются, а температуры дна стакана, крышки и гайки возрастают. В момент D температуры всех частей стакана практически выравниваются, а температуры крышки и гайки все еще отличаются вследствие значительного термического сопротивления между дета-

лями бомбы. Затем происходит медленное остывание бомбы и выравнивание температур ее частей.

Кривые изменения температур отражают особенности теплообмена некоторых частей бомбы. Так, кривая 3, отражающая температуру самой верхней части стакана, имеет острый пик, что вызвано интенсивным оттоком теплоты на расположенные вблизи крышку и гайку бомбы. На кривой 8, отражающей температуру дна бомбы, на интервале ВС видно уменьшение скорости нагрева, вызванное испарением налитой в бомбу воды.

На рис. 1, в показано распределение относительной температуры вдоль оси  $X$  (по высоте бомбы) в момент времени В, т.е. непосредственно после сгорания пробы. Это распределение может быть представлено в виде неравнобедренной трапеции. Приведенные экспериментальные результаты являются исходными данными для определения доли энергии сгорания пробы, которая приходится на соответствующий элемент поверхности камеры сгорания:

$$\frac{Q_g}{Q_{\text{П}}} = \frac{C_g}{C_{\text{КБ}}} \cdot \frac{T_g}{\Delta T_{\text{СР}}}.$$

По результатам расчета установлено, что доля энергии сгорания, передаваемая единице площади поверхности камеры сгорания в верхней части бомбы, почти в три раза превышает долю энергии, приходящуюся на единицу площади поверхности у дна бомбы.

Для исследования пространственного распределения температур и тепловых потоков разработана двухмерная сеточная модель ядра калориметрической системы - бомбы, ячейки и ТО. Для каждого элемента сетки по методу элементарных энергетических балансов составлено дифференциальное уравнение. Разработана компьютерная программа решения системы уравнений методом Рунге-Кутты четвертого порядка и расчета температур элементов модели и тепловых потоков через ТО. Проведен ряд вычислительных экспериментов при разнообразных параметрах конструкции и для разных видов топлива. На рис. 2 представлено распределение температур на внутренней поверхности ТО вдоль относительной высоты  $x$  в различные моменты времени  $t$  калориметрического эксперимента. Приведенные результаты соответствуют сгоранию пробы твердого (а) и газообразного топлива (б) при толщине стенки калориметрической ячейки из дюралюминия, равной 10 мм.

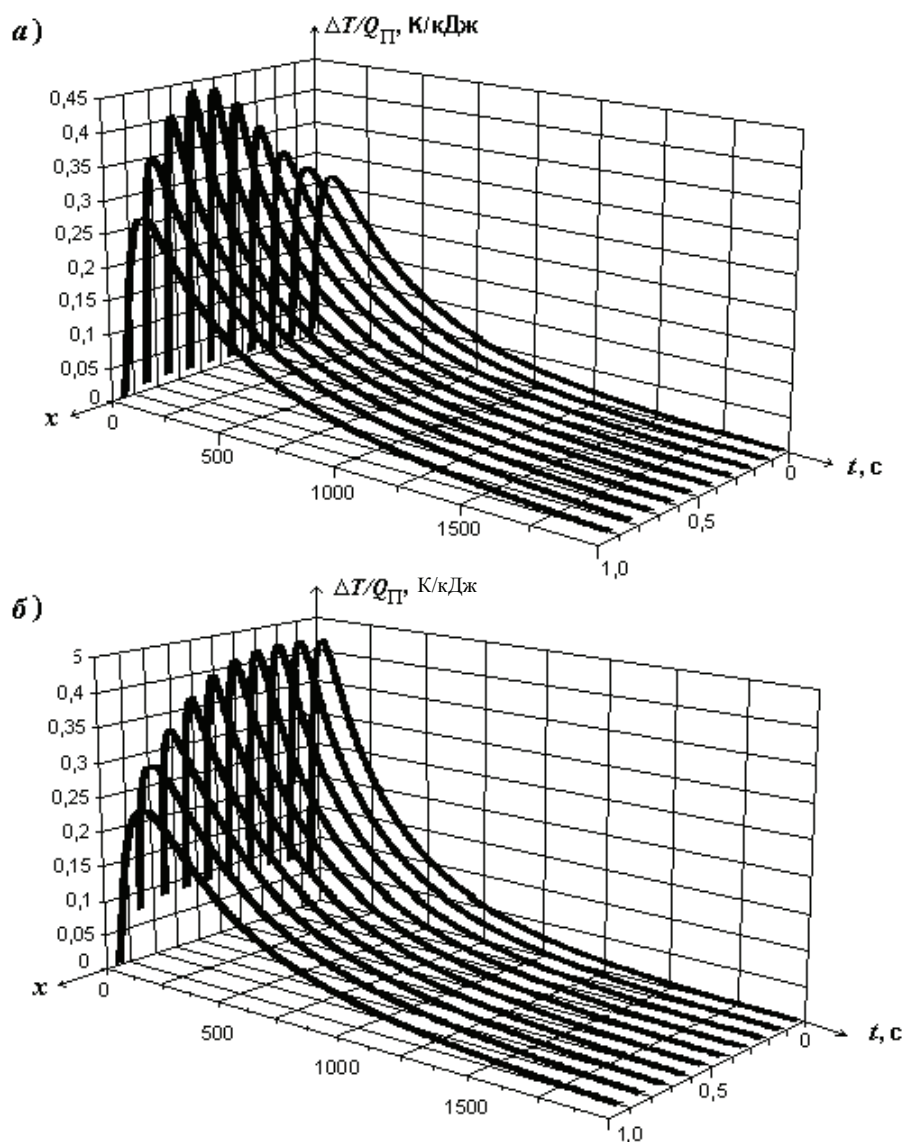
На рис. 3 представлено распределение вдоль высоты ячейки относительной энергии, которая проходит во время калориметрического опыта через ТО для твердых и газообразных топлив при разной толщине стенки ячейки.

При неравномерной пространственной чувствительности ТО различия в распределениях тепловых потоков приводят к возникновению дополнительной погрешности измерений. На основании результатов моделирования проведен анализ зависимости этой погрешности от толщины стенки калориметрической ячейки из дюралюминия и величины технологического разброса чувствительности участков ТО.

Обычно считают, что чувствительность измерительного преобразователя кондуктивного калориметра одинакова во всех точках его поверхности и поэтому показания прибора не зависят от пространственного распределения энергии [4]. Однако в реальных преобразователях всегда присутствует пространственная неравномерность чувствительности, вызванная разбросом геометрических размеров различных элементов вследствие несовершенства технологии изготовления, неомогенностью материалов и т.п. Из-за различия пространственного распределения энергии в опытах градуирования и при измерениях возникает дополнительная погрешность  $Q(x)/Q_{\text{СР}}$ .

Пусть ТО условно разделена на  $n$ , одинаковых по площади элементов. Чувствительность к проходящей энергии любого  $i$ -го элемента  $S_i$  может быть представлена в виде

$$S_i = S + \Delta S_i.$$

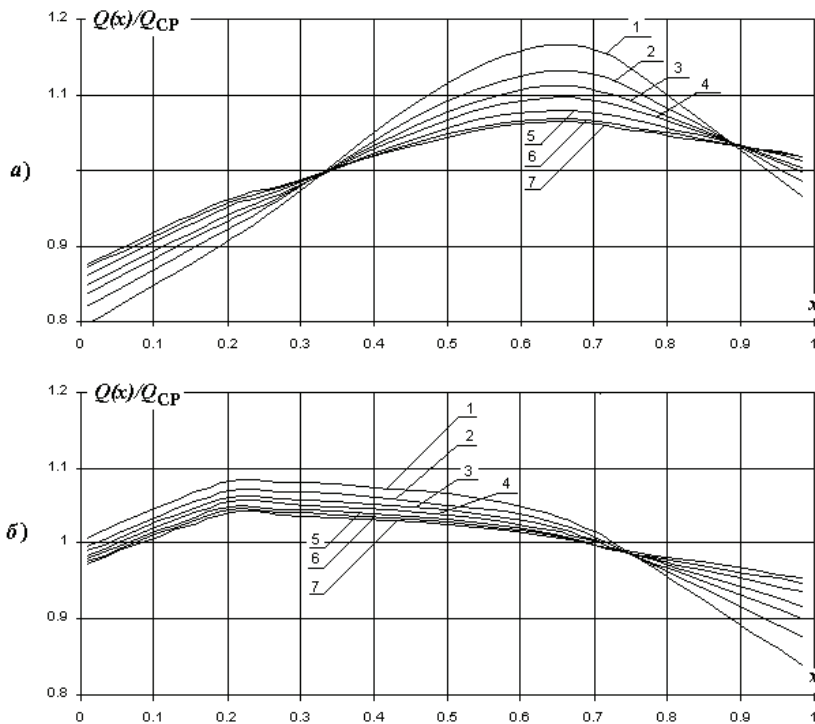


**Рис. 2** Распределение по высоте ячейки относительной температуры внутренней поверхности теплотрической оболочки при сгорании пробы твердого (а) и газообразного (б) топлива

Отметим, что в силу аддитивности измеряемой энергии и сигналов, генерируемых элементами оболочки, полная чувствительность всей оболочки к проходящей энергии также равна  $S$ . Пусть в опытах градуировки и при реальных измерениях выделяется одинаковая энергия, но при различном пространственном распределении энергии будут получены различные результаты:

- при градуировке 
$$Q_{ИЗМ,1} = \frac{1}{S} \left[ Q_n S + \sum_{i=1}^{n_{\Sigma}} \Delta Q_{i,1} \cdot \Delta S_i \right];$$

- при реальных измерениях 
$$Q_{ИЗМ,2} = \frac{1}{S} \left[ Q_n S + \sum_{i=1}^{n_{\Sigma}} \Delta Q_{i,2} \cdot \Delta S_i \right].$$



**Рис. 3** Распределение относительной энергии вдоль высоты ячейки для твердых (а) и газообразных (б) топлив при разной толщине стенки ячейки из дюралюминия:

1 - 6 мм; 2 - 8 мм; 3 - 10 мм; 4 - 12 мм; 5 - 15 мм; 6 - 18 мм; 7 - 20 мм

Учитывая, что  $Q_n S \gg \sum_{i=1}^{n_{\text{Э}}} \Delta Q_{i,1} \cdot \Delta S_i$ , находим выражение для составляющей относительной погрешности измерения из-за пространственной неоднородности  $\delta_{\text{ПН}}$ :

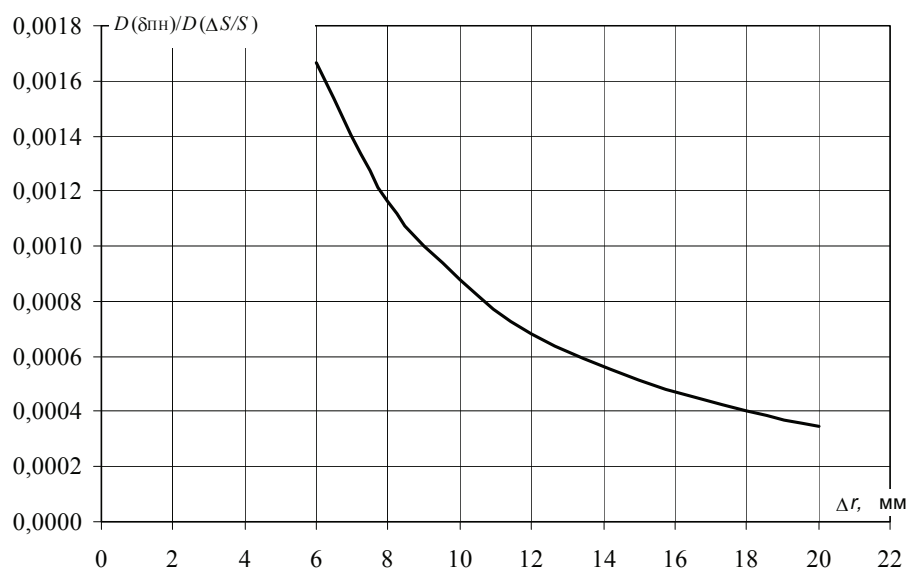
$$\delta_{\text{ПН}} = \frac{Q_{\text{ИЗМ},2} - Q_{\text{ИЗМ},1}}{Q_{\text{ИЗМ},1}} = \frac{1}{n_{\text{Э}}} \sum_{i=1}^{n_{\text{Э}}} \frac{\Delta Q_{i,2} - \Delta Q_{i,1}}{Q_{\text{СР}}} \cdot \frac{\Delta S_i}{S}.$$

Максимальное различие в пространственном распределении энергии наблюдается при градуировке по бензойной кислоте (твердому веществу) и измерении теплоты сгорания газа. Вследствие этого именно при измерении теплоты сгорания газа возможна максимальная погрешность из-за пространственной неравномерности чувствительности. Эта погрешность имеет мультипликативный характер и для ее уменьшения возможно использование различных индивидуальных градуировочных коэффициентов для различных видов топлива.

Считая значения  $\Delta S_i / S$  независимыми случайными величинами и воспользовавшись известными соотношениями для линейной функции случайных величин [5], получим

$$D(\delta_{\text{ПН}}) = \frac{D(\Delta S/S)}{n_{\text{Э}}^2} \times \sum_{i=1}^{n_{\text{Э}}} \left[ \frac{\Delta Q_{2,i}}{Q_{\text{СР}}} - \frac{\Delta Q_{1,i}}{Q_{\text{СР}}} \right]^2.$$

Как следует из приведенных на рис. 4 данных, с увеличением толщины стенки ячейки рассматриваемая составляющая погрешности существенно уменьшается.



**Рис. 4** Зависимость отношения дисперсии погрешности измерения  $D(\delta_{III})$  к дисперсии относительных отклонений чувствительности элементов ТО  $D(\Delta S/S)$  от толщины стенки калориметрической ячейки  $\Delta r$  из дюралюминия

В то же время увеличение толщины стенки приводит к ухудшению весогабаритных характеристик прибора и увеличению длительности подготовки к измерениям и самих измерений. Необходимо также учесть, что погрешность из-за пространственной неравномерности чувствительности преобразователя и распределения тепловых потоков является лишь одной из составляющих полной погрешности измерения. При проектировании бомбового калориметра и определении толщины стенки ячейки нужно учитывать допустимый уровень составляющей погрешности, возможную длительность проведения измерений, а также значения относительных отклонений чувствительности элементов ТО.

На основании разработанных моделей и с помощью экспериментальных исследований проведен анализ динамики тепловых процессов, пространственной неравномерности тепловых полей, влияния параметров конструкции на погрешности измерения кондуктивного бомбового калориметра. Выработаны рекомендации по определению основных параметров конструкции прибора, методикам градуировки и проведения измерений [6]. Полученные результаты использованы при проектировании калориметрической установки модели КТС-3, которая прошла государственную метрологическую аттестацию и допущена к эксплуатации в качестве рабочего средства измерения теплоты сгорания различных видов энергетических топлив с допустимой погрешностью измерения не более  $\pm 0,2\%$ .

#### Список литературы

1. Хеммингер В., Хене Г. Калориметрия. Теория и практика. - М: Химия, 1990. - 176 с.
2. Воробьев Л.И., Грищенко Т.Г., Декуша Л.В. Бомбовые калориметры для определения теплоты сгорания топлива // Инженерно-физический журнал. -1997. - Т.70, №5. - С.828-839.
3. Воробьев Л.И., Декуша Л.В., Котенко В.М. КТС-3 - бомбовый калориметр для измерения теплоты сгорания топлива // Тезисы докл. Междунар. научно-практической конф. «Региональные проблемы энергосбережения в производстве и потреблении энергии» - К.: ИТТФ НАНУ. - 1999. - С.53-54.

4. Кальве Э., Прат А. Микрокалориметрия. Применение в физической химии и биологии. - М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. - 478 с.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1977. - 832 с.
6. Воробьев Л.И. Кондуктивный бомбовый калориметр для измерения теплоты сгорания топлива: Дисс. ... канд. техн. наук. - Киев: Институт технической теплофизики НАНУ, 2001. - 169 с.
- 

#### **To Space Irragularity of Heat Patterns in Conductive Bomb Calorimeter**

**L.I. Vorobyev, T.G. Grischenko, L.V. Dekusha**

*Institute of Technical Thermal Physics NAS, Ukraine*

**Key words and phrases:** calorimeter bomb; conductive calorimeter; measurement error; heat of combustion; thermophysical measurements.

**Abstract:** Temperature distribution on the surface of calorimeter bomb at combustion of different types fuel samples is investigated experimentally. Modeling of space irregularity of heat patterns in conductive bomb calorimeter is carried out and corresponding component of error measurement is examined.

---

#### **Über die Raumungleichmäßigkeit der Wärmefelder im konduktiven Bombenkalorimeter**

**Zusammenfassung:** Es ist die Verteilung der Temperaturen auf der Oberfläche der kalorimetrischen Bombe bei der Verbrennung der Probe von verschiedenen Arten der Brennstoffe experimentell untersucht. Es ist die Modellierung der Raumungleichmäßigkeit der Wärmefelder im konduktiven Bombenkalorimeter durchgeführt und den entsprechenden Bestandteil des Messungsfehlers untersucht.

---

#### **Sur l'inégalité superficielle des champs thermiques dans un colorimètre de conduction à bombe**

**Résumé:** On a étudié expérimentalement la répartition des températures sur la surface de la bombe calorimétrique au cours du brûlage des échantillons de différents types du combustible. On a fait le modélage de l'inégalité superficielle des champs thermiques dans un colorimètre de conduction à bombe et l'on a étudié la composante correspondante de l'erreur.

---