

УДК 536.5.532+629.7.018.1

Влияние способа нанесения царапин на характеристики термосенсоров

Х.А. Мохаммед, Х. Саллех, М.З. Юсофф

Национальный университет Тенага, Кайанг, Селангор, Малайзия

E-mail: Hussein@uniten.edu.my

Изучено влияние способа нанесения царапин, главным образом посредством обработки контактных поверхностей изготавливаемого сенсора наждачной бумагой или лезвием скальпеля, на характеристики термосенсоров. Описана методика динамической калибровки термосенсоров в ударной трубе, которая использовалась для оценки их теплового произведения (thermal product). Согласно нашим данным, величина теплового произведения конкретного типа сенсора зависит от числа Маха, от способа нанесения царапин на контактные поверхности сенсора, от места расположения термпарного перехода, а также от энтальпийных условий. Показано, что использование различных способов нанесения царапин на контактные поверхности обычно приводит к различным значениям величины теплового произведения сенсоров. Используемая экспериментальная процедура дает полезные с практической точки зрения данные о величине теплового произведения сенсоров; эти данные могут быть использованы для измерения нестационарных тепловых потоков в гиперзвуковых условиях.

Ключевые слова: термосенсор, тепловое произведение, контактная поверхность.

ВВЕДЕНИЕ

Точное измерение скорости теплопереноса с давних пор считается ключевым моментом в исследованиях, направленных на дальнейшее совершенствование устройств нестационарного преобразования энергии, таких как двигатели внутреннего сгорания [1–6], летательные аппараты [7–9], орудийные стволы [10], а также в экспериментах с кипением [11–13]. Тепловой поток в таких устройствах обычно весьма велик (порядка сотен киловатт на квадратный метр) и весьма нестационарен. В результате для соответствующих приложений требуется термосенсор с шероховатой контактной поверхностью и быстрым откликом. Коаксиальная конструкция сенсора была предложена Бендерским [14]. Другие сенсоры для исследования поверхности изготавливались с нанесением царапин на контактные поверхности наждачной бумагой или острым инструментом [15]. Поверхностные сенсоры также изготавливались с использованием двух параллельных проволок [16] или полосчатых элементов [1–3]. Коаксиальные термосенсоры обеспечивают измерение температуры вблизи исследуемой поверхности благодаря низкой тепловой инерционности их контакта. Для определения динамики мгновенного теплового потока из измеренной временной зависимости температуры поверхности необходимо использовать подходящую экспериментальную методику,

позволяющую получать точные оценки величины теплового произведения β конкретного сенсора в условиях нестационарной теплопроводности. Все термосенсоры, использованные в настоящей работе, сконструированы в нашей лаборатории; процедура их изготовления детально описана в публикациях [17, 18]. Следует отметить, что калибровка каждого термосенсора является существенным моментом, поскольку при использовании литературных данных о теплофизических свойствах материалов сенсоров [19–21] ошибка в калибровке может достигать 23 % и даже превышать эту величину [17].

Многие исследователи измеряли тепловое произведение сенсоров, используя различные методики. В работе [2] калибровали применявшиеся ими датчики тепловых потоков, используя мощные водоохлаждаемые источники излучения мощностью 36 кВт. Для измерения величины β и определения времени отклика нескольких типов датчиков температуры поверхности авторы работы [4] применяли радиационную методику с использованием лазерных импульсов. Та же методика использовалась в работе [22], в которой для генерации входного ступенчатого теплового потока, призванного обеспечить в относительно продолжительном временном масштабе (от 0,1 до 1 сек) эрозию полосчатого промышленного датчика типа К [23], использовали вольфрамогалогеновую лампу. В работе [15] в качестве мощного импульсного теплового источника для определения времени отклика датчика температуры поверхности использовалась импульсная лампа с энергией 200 Дж. Лазерная методика применялась в работе [24] для оценки динамических характеристик поверхностного датчика посредством измерения его функции отклика на единичный импульс. В работе [25] предложен численный алгоритм для определения тепловой емкости датчика калориметра с использованием техники погружения. Авторы работы [26] описали метод определения величины теплового произведения β тонкопленочного или поверхностного датчика при заданном возрастании температуры, в этом методе используется оптическая методика, основанная на применении мощного лазера с известными характеристиками. Для измерения скорости теплопереноса на сферически затупленном конусе с разными радиусами закругления в работе [8] калибровались поверхностные датчики в ударной трубе со свободно движущимся поршнем. Та же процедура калибровки использовалась в работе [9] для измерения скорости теплопереноса в точке торможения гиперзвукового потока на круглом цилиндре.

Таким образом, хотя во всех предыдущих работах и исследовалось влияние величины теплового сопротивления на работу датчика [15], эти работы, тем не менее, не дают ясного понимания важности использования различных материалов сенсоров, включая роль различия теплофизических характеристик положительных и отрицательных сенсорных элементов. Кроме того, в этих работах не приводятся данные о величинах теплового произведения β различных сенсоров с разными чувствительными поверхностями на временах порядка микросекунды. В настоящей статье мы описываем экспериментальную методику для оценки величины теплового произведения миниатюрного высоконадежного термосенсора с малым временем отклика. Мы обсуждаем также влияние различных способов нанесения царапин на контактные поверхности, в основном с использованием наждачной бумаги или лезвия скальпеля, на величину теплового произведения сенсоров в гиперзвуковых установках в условиях высоких энтальпий.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТЕРМОДАТЧИКОВ

Ниже мы приводим краткое описание процедуры изготовления нашего термосенсора (более подробное описание можно найти в [17]). Конструкция и процедура изготовления конкретного типа сенсора определяются, в основном, величиной термоэдс, образующейся на контакте двух разнородных металлов.

В настоящей работе одним из двух материалов сенсора служила сама подложка; тем самым достигалась надежная конструкция, способная выдерживать интенсивные нестационарные тепловые потоки. Термосенсор сконструирован и изготовлен из элементов типа К (хромель–алюмель). Каждый сенсор состоит из внутренней проволоки диаметром 1 мм (положительный или отрицательный элемент) и полого выфрезерованного кольцевого канала внешним диаметром 2 мм, содержащего второй (положительный или отрицательный) элемент в виде втулки (цилиндра) с толщиной стенки примерно 0,25 мм. Подготовка внутренней проволоки и внешнего кольцевого канала осуществлялась с использованием станка для отрезки проволоки, а сам кольцевой канал высверливался с помощью очень тонкого бурового долота. Внутренняя проволока затем помещалась коаксиально в симметричное положение внутри полого выфрезерованного цилиндра другого элемента. В методе формирования сенсорного контакта использовалось истирание открытой поверхности треугольным долотом через тонкий зазор. В этом случае для образования малого зазора между сенсорными элементами требуются очень точные допуски, при этом эффективная толщина контакта масштабируется с шириной зазора. Таким образом, контакты сенсоров формируются мягким шлифованием торцевой поверхности элементов с использованием двух методов нанесения царапин: при помощи наждачной бумаги с разным размером зерна и при помощи скальпельного лезвия разной толщины. Использовалась наждачная бумага со следующим размером зерна: 100, 150, 200, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 и 2000# (производитель — Shandong Boss Abrasives Manufacturing Co.Ltd., КНР). Скальпельные лезвия имели следующие толщины: 20, 40, 60 мкм (производитель — Yancheng Huida Medical Instruments Co. Ltd, КНР). Кроме того, два элемента сенсора изолировались друг от друга очень тонким слоем эпоксидной смолы Аральдит (Araldite) толщиной несколько микрон. Схематичное изображение собранного узла сенсора показано на рис. 1. Неизменными параметрами термопар при переходе от одного образца к другому являются длина и диаметр термопарных элементов; величины этих параметров тщательно контролировались в процессе изготовления сенсора посредством точных измерений длины и диаметра двух элементов. Кроме того, использование одного и того же типа наждачной бумаги или скальпеля осуществлялось посредством движения наждачной бумаги с выбранным размером зерна на конце сборки сенсора в двух горизонтальных направлениях (назад и вперед). Помимо этого, при изготовлении контакта с помощью лезвия скальпеля использовалось также одно перпендикулярное направление на срезе.

В настоящей работе применялась методика микроструктурного исследования материалов термосенсоров. Эта методика использовалась для выявления морфологии поверхности и контроля степени притирки элементов сенсоров. Данные на рис. 2 и 3 получены с помощью сканирующего электронного микроскопа XL-30 фирмы Philips. На указанных рисунках показан зазор и толщина электрической изоляции между элементами сенсора, а также контакт как он виден на открытой поверхности термосенсора. Перед исследованием методом сканирующей электронной микроскопии двух элементов сенсоров выполнялись следующие операции: поверхность двух элементов шлифовалась на шлифовальном станке (модель Struers PO1-25) с использованием воды в качестве смазывающего

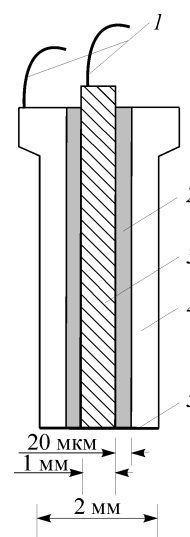


Рис. 1. Схематическое изображение термосенсора.
1 — электрическое соединение, 2 — изоляционный материал, 3 — отрицательный элемент, 4 — положительный элемент, 5 — спай сенсора.

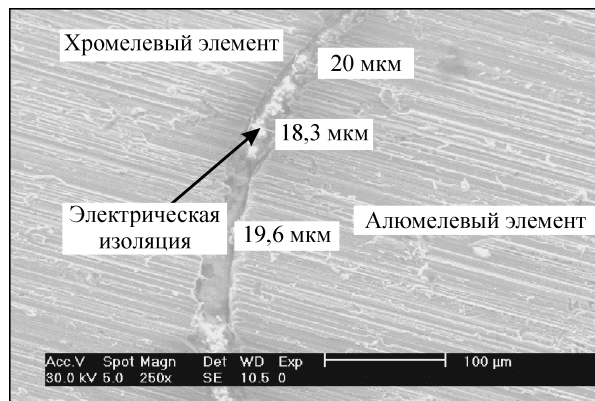


Рис. 2. Толщина изолирующего слоя между элементами термосенсора по данным сканирующей электронной микроскопии.

агента. Затем осуществлялась полировка поверхности, сначала с использованием наждачной бумаги с размером зерна 1200#, а затем, на заключительной стадии полировки, — с размером зерна 120#. Следующая после операции шлифовки операция полировки на станке осуществлялась после очистки поверхностей двух элементов тканевым диском толщиной 1 мкм, имеющим диаметр 200 мм. Затем для придания поверхности блеска на поверхности элементов наносился слой алмазной пасты толщиной от 1 до 3 микрон. Наконец, для охлаждения и тонкой полировки использовалась зеленая смазочная жидкость (DP) (модель станка — Struers brand). Наблюдения поверхности контакта методом сканирующей электронной микроскопии при 700-кратном увеличении показали, что обработка кончика термосенсора наждачной шкуркой приводила к размыванию тонких полосок одного материала в зазоре, что позволяло осуществить его совершенный контакт со вторым материалом (см. рис. 3). Наблюдения контакта сенсора методом сканирующей электронной микроскопии показали также, что толщина электрической изоляции в термодатчике варьировала от 10 до 20 микрон (см. рис. 2).

Результаты предварительного испытания термосенсора свидетельствуют о возможности изготовления хорошего сенсора даже при средней толщине электрической изоляции 20 микрон. Тем не менее, можно думать, что конструкция сенсора в действительности могла бы быть улучшена путем уменьшения ширины

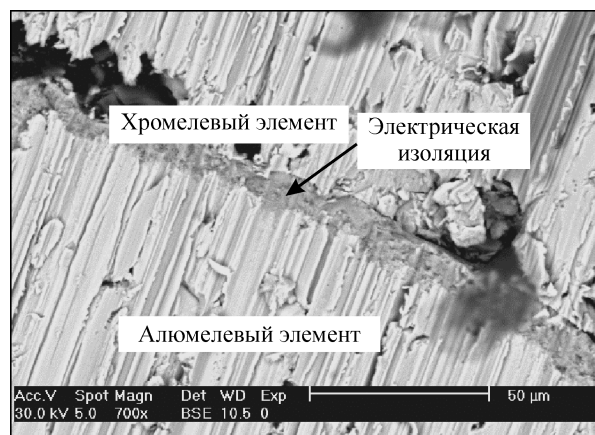


Рис. 3. Поверхностный контакт между двумя элементами термосенсора по данным сканирующей электронной микроскопии.

зазора. Хотя контакт поверхностей сенсора осуществлялся путем прямого механического соприкосновения двух элементов, как будет видно из дальнейшего, была достигнута высокая надежность конструкции сенсора, обладающего временем отклика менее 50 мкс в жестких внешних условиях (а именно, в условиях ударной трубы).

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ СЕНСОРОВ

Имеется необходимость в знании теплофизических свойств термосенсора, или, более конкретно, в знании величины его теплового произведения β . Поэтому нами были получены новые корреляционные соотношения для оценивания теплофизических свойств элементов термосенсоров; это было сделано для того, чтобы иметь альтернативный способ достаточно точного определения теплофизических свойств сенсоров. Данные о теплофизических свойствах элементов термосенсоров заимствованы из работ [27] и [28, 29]. Согласно работе [27], приближенный элементный анализ материалов термосенсоров типа К дает следующие данные о содержании компонентов в типичных используемых материалах: содержание компонентов в алюмеле: 94–96 % Ni, 1–1,5 % Si, 1,3–2,5 % Al, 1,8–3,25 % Mn, а также меньшее количество железа и других примесей, содержание компонентов в хромеле: 89–90 % Ni, 9–9,5 % Cr, до 0,5 % Si, 0,02–0,65 % Fe, от 0,01 до 0,8 % Mn. Хотя основным компонентом элементов класса К является никель, хромель и алюмель значительно различаются по своим теплофизическим свойствам. Согласно [28], применявшийся нами алюмель состоял из 72 % Ni, 25 % Mn, 2 % Al, 1 % Si, а хромель был таким же, как тот, который использовался в работе [27], т. е. содержал 90 % Ni и 10 % Cr. Как показано нами в работе [17], величина β для алюмелевых и хромелевых элементов при 25 °С различалась примерно на 23 %, она также отличалась от среднего значения при температуре окружающей среды примерно на 15 %. Безусловно, для получения точных результатов требуется динамическая калибровка каждого отдельного сенсора. Поэтому мы снова проводили детальное сопоставление с данными работ [27–29]. Нами получены новые корреляционные соотношения для удельной теплоемкости и коэффициента теплопроводности обоих материалов; эти данные представлены как функция температуры на рис. 4 и 5. Эти корреляции, представленные прямыми линиями, получены либо путем определения наклона (в случае корреля-

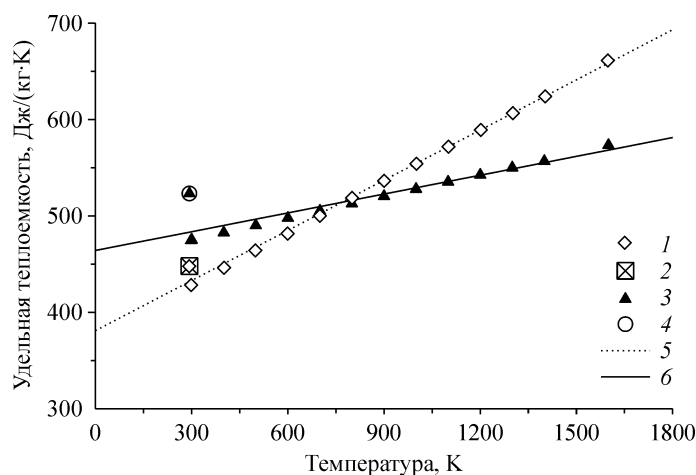


Рис. 4. Зависимость удельной теплоемкости материалов элементов термосенсора от температуры.

Хромелевые элементы: [18] (1), [27] (2), по формуле (1) (5);
 алюмелевые элементы: [28] (3), [27] (4), по формуле (3) (6).

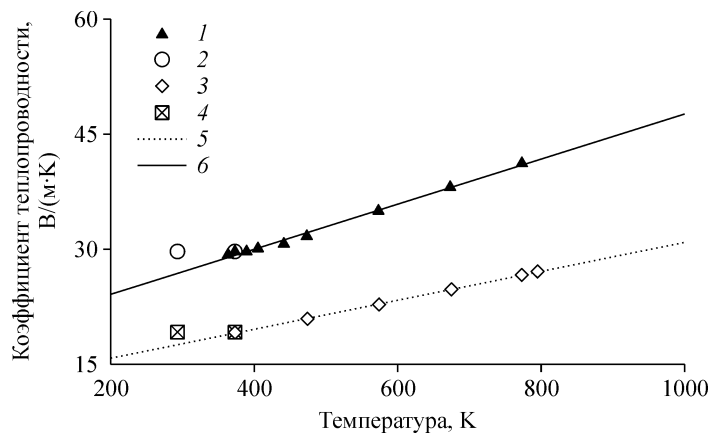


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности материалов элементов термосенсора от температуры.

Алюмелевые элементы: [29] (1), [27] (2), по формуле (4) (6);
хромелевые элементы: [29] (3), [27] (4), по формуле (2) (5).

ционных данных работ [28, 29]), либо путем определения величины отсечки в случае данных работы [27]. Этот подход выглядит особенно очевидным при рассмотрении корреляции для удельной теплоемкости алюминия (см. рис. 4), где самый близкий по составу материал среди материалов, использовавшихся в работе [28], — 72 % Ni, 1 % Si, 2 % Al, 25 % Mn, значительно отличается от данных анализа состава алюминия, приведенных в [27]. Таким образом, нами были получены следующие корреляционные соотношения для элементов, выполненных из хромеля и алюминия:

$$c_{cr} = 0,178664T + 375,053 \quad (1)$$

$$\kappa_{cr} = 0,0191199T + 11,8513 \quad (2)$$

$$c_{al} = 0,0751194T + 452,678 \quad (3)$$

$$\kappa_{cr} = 0,0298301T + 17,9676. \quad (4)$$

Кроме того, величины β для алюмелевых и хромелевых элементов, определенные из полученных корреляционных соотношений (1)–(4) с использованием литературных данных о плотности веществ, могут быть легко рассчитаны как функция температуры. При 20 °С мы имеем: $B_{cr} = 8070 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{сек}^{1/2}$ и $B_{al} = 10442 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{сек}^{1/2}$, что дает различие в $2372 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{сек}^{1/2}$ или примерно на 23 %. Таким образом, для каждого термосенсора требуется динамическая калибровка, поскольку, как будет показано в следующих разделах, эффективная величина теплового произведения для конкретной конструкции термосенсора зависит от места расположения контакта перехода (на хромелевом либо алюмелевом элементе или в окрестности электрической изоляции).

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ТЕПЛООВОГО ПРОИЗВЕДЕНИЯ СЕНСОРА

Способ определения величины β иллюстрируется калибровкой изготовленных термосенсоров в ударной трубе на временах порядка микросекунды. Подробное описание использованной ударной трубы дано в работах [17, 18]. Эксперименты были выполнены для того, чтобы оценить характеристики изготовленного термосенсора с использованием указанной установки кратковременного действия,

а также для того, чтобы продемонстрировать способность датчиков выдерживать высокоэнтальпийные условия. Поэтому мы использовали следующее калибровочное соотношение, предложенное в работе [7], основанием для которого служит одномерная теория теплопроводности:

$$\frac{T_{TS} - T_{\infty}}{T_{R5} - T_{\infty}} = \frac{B_{R5}}{\beta_{R5} + \beta_{TS}}. \quad (5)$$

Здесь T_{R5} и B_{R5} — температура и тепловое произведение рабочей текучей среды за отраженной ударной волной, $T_{TS} - T_{\infty}$ — приращение температуры поверхности, измеренное изготовленным термосенсором, а B_{TS} — тепловое произведение конкретного термосенсора, определенное из соотношения (5). В настоящей работе термосенсоры вмонтированы заподлицо с расположенной ниже по течению поверхностью трубы (в экспериментальном участке), либо заподлицо с верхней торцевой поверхностью ударной трубы. Таким образом, когда ударная волна отражается от оконечной части стенки трубы, текучая среда испытывает ступенчатое изменение температуры, величина которого в идеальных условиях определяется соотношением (5). Соотношение (5) использовалось нами для оценки величины β каждого рассматриваемого термосенсора с достаточной точностью, которая отличалась от регистрируемой температуры поверхности и от скачка температуры в текучей среде на торцевой стенке экспериментального участка трубы. Изменение температуры рабочей среды ($T_{R5} - T_{\infty}$) оценивалось из скорости падающей ударной волны u посредством анализа для идеального калорически несовершенного газа. Плотность, давление и энтальпия рабочей среды за отраженной ударной волной также вычислялись из уравнений идеального газа в форме, предложенной Андерсоном [30] и Зурковым [31]. Коэффициент теплопроводности и удельная теплоемкость при постоянном давлении оценивались соответственно с использованием закона Сазерлэнда в форме, предложенной Уайтом [32], и соотношения, предложенного Варгафтиком с соавторами в работе [33].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Возрастание температуры поверхности

Всего произведено 80 запусков трубы, выполненных с применением 16 термосенсоров, изготовленных с использованием различных способов нанесения царапин на их контактные поверхности (подробные данные содержатся в табл. 1). Эксперименты выполнены с использованием комбинации гелий–CO₂ в ударной трубе с разными значениями коэффициента давления диафрагмы P_4/P_1 (от 10 до 200). Разные значения коэффициента давления диафрагмы использовались для того, чтобы можно было производить измерения нестационарной температуры поверхности и, в конечном счете, определять величину теплового произведения сенсора. Пример записи температуры поверхности, выполненный с помощью нашего термосенсора, изготовленного с применением различных способов нанесения царапин на контактные поверхности, для нескольких выбранных запусков трубы показан на рис. 6. Из рисунка видно, что наблюдается малое изменение в возрастании температуры поверхности. В действительности эффект связан с различием тепловых произведений рабочей среды (в нашем случае CO₂) и термосенсора, при том, что имеет место значительное изменение температуры углекислого газа, вызванное сжатием ударной волны. Далее, в контакте непосредственно за областью отражения ударной волны полностью отсутствует движение воздуха. Таким

Таблица 1

Характеристики термосенсоров, изготовленных с применением наждачной бумаги или лезвия скальпеля

Сенсор	Инструмент, использовавшийся для нанесения царапин на контактные поверхности сенсора	Способ формирования контакта сенсора	Расположение перехода	Толщина изоляции
KA80A	Наждачная бумага 80#, Shandong Boss	Хромель к алюмелю	Алюмель (А)	20 мкм
KA80A/R*	Наждачная бумага 80#, Shandong Boss	Хромель к алюмелю	Алюмель (А)	18 мкм
KA150C	Наждачная бумага 150#, Shandong Boss	Алюмель к хромелю	Хромель (С)	16,4 мкм
KA150C/R*	Наждачная бумага 150#, Shandong Boss	Алюмель к хромелю	Хромель (С)	15 мкм
KA320AC/K**	Наждачная бумага 320#, Shandong Boss	Хромель к алюмелю	Алюмель и хромель (АС)	15 мкм
KA400A	Наждачная бумага 400#, Shandong Boss	Хромель к алюмелю	Алюмель (А)	17 мкм
KA600AC/K**	Наждачная бумага 600#, Shandong Boss	Хромель к алюмелю	Алюмель и хромель (АС)	16 мкм
KA1000AC/K**	Наждачная бумага 1000#, Shandong Boss	Хромель к алюмелю	Алюмель и хромель (АС)	19,4 мкм
KA1200AC	Наждачная бумага 1200#, Shandong Boss	Хромель к алюмелю	Алюмель и хромель (АС)	14 мкм
KA1500AC/K**	Наждачная бумага 1500#, Shandong Boss	Хромель к алюмелю	Алюмель и хромель (АС)	18 мкм
KS20A	Скальпельное лезвие 20 мкм, Yancheng huida	Хромель к алюмелю	Алюмель (А)	18,8 мкм
KS20C	Скальпельное лезвие 20 мкм, Yancheng huida	Алюмель к хромелю	Хромель (С)	18 мкм
KS40C	Скальпельное лезвие 40 мкм, Yancheng huida	Алюмель к хромелю	Хромель (С)	17,4 мкм
KS40C	Скальпельное лезвие 40 мкм, Yancheng huida	Алюмель к хромелю	Хромель (С)	16,6 мкм
KS60A	Скальпельное лезвие 60 мкм, Yancheng huida	Хромель к алюмелю	Алюмель (А)	16,9 мкм
KS60C	Скальпельное лезвие 60 мкм, Yancheng huida	Алюмель к хромелю	Хромель (С)	18,8 мкм

Обозначения: А — наждачная бумага, А — алюмелевый элемент, С — хромелевый элемент, АС — алюмелевый и хромелевый элементы, К — термосенсор типа К, R* — повторное изготовление термосенсора, ** — подновленный термосенсор, S — скальпельное лезвие.

образом, углекислый газ остается неподвижным только в течение очень короткого промежутка времени после отражения ударной волны из-за эффекта размывания пограничного слоя, оказывающего влияние на углекислый газ в оконечной части ударной трубы.

Рисунок 6 показывает также, что записанные кривые эволюции температуры поверхности проявляют два основных максимума. Первый максимум соответствует распространению падающей ударной волны, которая сжимает и нагревает углекислый газ до более высокой температуры, чем та, которая указана на рисунке. Второй максимум соответствует распространению отраженной ударной волны, которая снова сжимает и нагревает углекислый газ до повышенной температуры. Затем температура поверхности выравнивается (после того, как интенсивности падающей и отраженной ударных волн ослабевают). Например, температура поверхности, измеренная термосенсором KA150A, возросла в первом максимуме

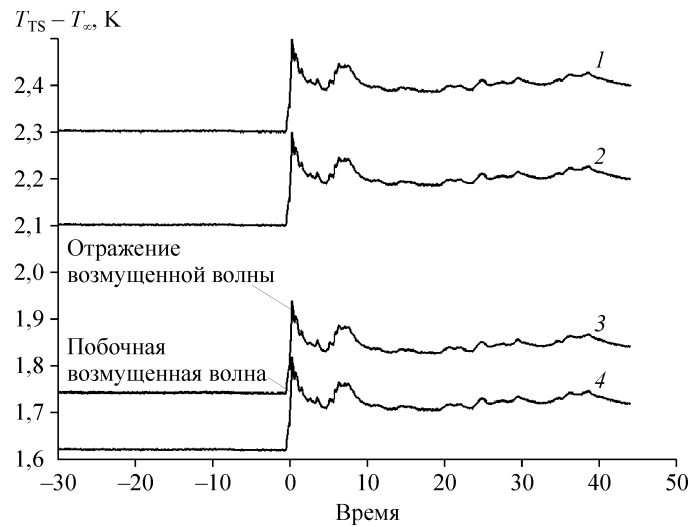


Рис. 6. Временная зависимость температуры поверхности, измеренная разными термосенсорами при $M_s = 3,371$.
KS20A (1), KA150A (2), KA80A (3), KA600AC (4).

до 2,15 К, в то время как во втором максимуме она возростала до 2,28 К. Далее, из рис. 6 видно, что зарегистрированная величина увеличения температуры поверхности слегка различается для каждого термосенсора. Эта величина зависит от способа формирования контакта сенсора, а также от места расположения контакта (на положительном/отрицательном элементе или в окрестности изолирующего слоя). Этот эффект будет дополнительно исследован и проинтерпретирован в следующем разделе. Экспериментальные условия, в которых производилась динамическая калибровка датчиков, указаны в табл. 2, а экспериментальные результаты, полученные в экспериментах на ударной трубе с комбинацией гелий- CO_2 , приведены в табл. 3. Для оценки теплового произведения каждого отдельного термосенсора производилось шесть запусков трубы с повышением величины энтальпии от низкого значения до высокого.

Величина теплового произведения сенсоров

Величины теплового произведения, извлеченные из анализа экспериментальных данных, полученных в ходе динамической калибровки сенсоров, показаны на рис. 7 и 8. Видно, что тепловое произведение B_{TS} каждого отдельного термосенсора является функцией условий, при которых осуществлялась калибровка (температура рабочей среды и энтальпия). Таким образом, было получено, что диапазон (стандартное отклонение средних величин) изготовленного термосенсора

Таблица 2

Экспериментальные условия, использованные в экспериментах в ударной трубе с комбинацией гелий- CO_2

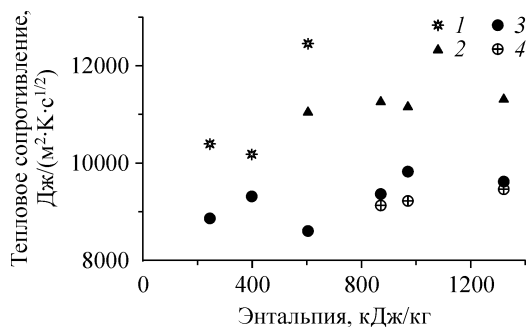
Пуск трубы	Число Маха в падающей ударной волне, M_s	Энтальпия, кДж/кг	К	Дж/м ² ·Кс ^{1/2}
1	2,211	244,946	703,766	9,703
2	2,753	398,385	959,935	14,266
3	3,371	604,064	1317,035	19,953
4	4,057	870,782	1796,055	26,565
5	4,289	970,155	1977,857	28,812
6	5,035	1321,186	2630,497	39,457

Таблица 3

Данные, полученные в экспериментах в ударной трубе с комбинацией гелий–СО₂

Пуск трубы	Сенсор	Инструмент, использованный для нанесения царапин на контактные поверхности сенсора	$T_{TS}-T_{\infty}$ (К)	β_{TS} (Дж/м ² ·Кс ^{1/2})	
1	KA80A	Наждачная бумага 80#, Shandong Boss	0,351	11309,493	
	KA150C	Наждачная бумага 150#, Shandong Boss	0,41	9683,426	
	KA320AC	Наждачная бумага 320#, Shandong Boss	0,422	9408,35	
	KA600AC	Наждачная бумага 600#, Shandong Boss	0,395	10050,79	
	KA1000AC	Наждачная бумага 1000#, Shandong Boss	0,367	10816,859	
	KA1500AC	Наждачная бумага 1500#, Shandong Boss	0,358	11088,55	
	KS20A	Скальпельное лезвие 20 μ m, Yancheng huida	0,382	10392,50	
	KS40C	Скальпельное лезвие 40 μ m, Yancheng huida	0,448	8862,89	
	2	KA80A	Наждачная бумага 80#, Shandong Boss	0,941	10094,43
		KA150C	Наждачная бумага 150#, Shandong Boss	0,978	9713,08
KA320AC		Наждачная бумага 320#, Shandong Boss	0,91	10437,818	
KA600AC		Наждачная бумага 600#, Shandong Boss	0,821	11567,777	
KA1000AC		Наждачная бумага 1000#, Shandong Boss	0,872	10892,06	
KA1500AC		Наждачная бумага 1500#, Shandong Boss	0,894	10624,37	
KS20A		Скальпельное лезвие 20 μ m, Yancheng huida	0,933	10180,86	
KS40C		Скальпельное лезвие 40 μ m, Yancheng huida	1,02	9313,71	
3		KA80A	Наждачная бумага 80#, Shandong Boss	1,971	10366,34
		KA150C	Наждачная бумага 150#, Shandong Boss	2,245	9103,485
	KA320AC	Наждачная бумага 320#, Shandong Boss	1,59	12845,444	
	KA600AC	Наждачная бумага 600#, Shandong Boss	1,692	12072,28	
	KA1000AC	Наждачная бумага 1000#, Shandong Boss	1,626	12561,49	
	KA1500AC	Наждачная бумага 1500#, Shandong Boss	1,64	12454,43	
	KS20A	Скальпельное лезвие 20 μ m, Yancheng huida	2,376	8602,68	
	KS40C	Скальпельное лезвие 40 μ m, Yancheng huida	1,85	11042,95	
	4	KA80A	Наждачная бумага 80#, Shandong Boss	3,816	10476,05
		KA150C	Наждачная бумага 150#, Shandong Boss	4,194	9534,26
KA320AC		Наждачная бумага 320#, Shandong Boss	3,357	11904,8	
KA600AC		Наждачная бумага 600#, Shandong Boss	3,127	12778,48	
KA1000AC		Наждачная бумага 1000#, Shandong Boss	3,964	10085,91	
KA1500AC		Наждачная бумага 1500#, Shandong Boss	4,271	9362,85	
KS60A		Скальпельное лезвие 60 μ m, Yancheng huida	3,551	11255,87	
KS60C		Скальпельное лезвие 60 μ m, Yancheng huida	4,381	9128,425	
5		KA150C	Наждачная бумага 150#, Shandong Boss	5,231	9300,140
		KA320AC	Наждачная бумага 320#, Shandong Boss	4,572	10636,50
	KA600AC	Наждачная бумага 600#, Shandong Boss	4,716	10312,593	
	KA1000AC	Наждачная бумага 1000#, Shandong Boss	4,787	10160,066	
	KA1500AC	Наждачная бумага 1500#, Shandong Boss	4,813	10105,34	
	KS40C	Скальпельное лезвие 40 μ m, Yancheng huida	4,951	9824,48	
	KS60A	Скальпельное лезвие 60 μ m, Yancheng huida	4,36	11152,277	
	KS60C	Скальпельное лезвие 60 μ m, Yancheng huida	5,276	9221,063	
	6	KA150C	Наждачная бумага 150# (Shandong Boss)	9,532	9706,94
		KA320AC	Наждачная бумага 320#, Shandong Boss	7,641	12099,46
KA600AC		Наждачная бумага 600#, Shandong Boss	7,561	12227,055	
KA1000AC		Наждачная бумага 1000#, Shandong Boss	7,741	11943,660	
KA1500AC		Наждачная бумага 1500#, Shandong Boss	8,283	11164,71	
KS40C		Скальпельное лезвие 40 μ m, Yancheng huida	9,621	9617,51	
KS60A		Скальпельное лезвие 60 μ m, Yancheng huida	8,177	11308,93	
KS60C		Скальпельное лезвие 60 μ m, Yancheng huida	9,781	9460,83	

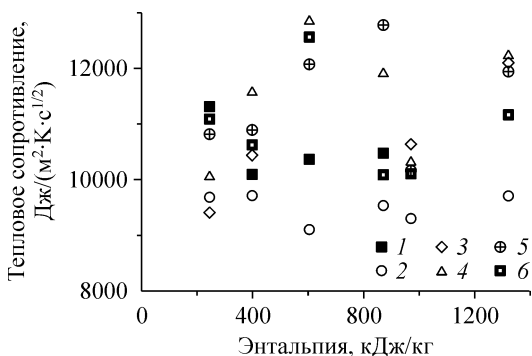
Рис. 7. Зависимость теплового произведения сенсора от энтальпии для нескольких термосенсоров, сформированных после обработки контактных поверхностей лезвием скальпеля. KS20A (1), KS60A (2), KS40C (3), KS60C (4).



варьировал от одного экземпляра сенсора к другому, поскольку этот диапазон зависел от способа нанесения царапин на контактные поверхности и от местоположения

перехода сенсора. Эксперименты со смесью гелий–CO₂ показали, что имеет место разброс диапазонов величин тепловых произведений изготовленных термосенсоров. Между тем, термосенсоры, изготовленные с применением наждачной бумаги и при помощи лезвия скальпеля, демонстрируют близкие диапазоны величин теплового произведения, за исключением сенсоров KA600AC и KS20A, диапазон величин тепловых произведений которых составлял соответственно 10,02 и 10,26 %. Диапазон величин тепловых произведений сенсоров KA80A, KA150C, KA320AC, KA1000AC, KA1500AC, KS40C, KS60A, и KS60C составлял 4,54, 2,31, 9,61, 8,92, 8,39, 4,19, 1,02 и 1,41 % соответственно.

В ходе анализа результатов, полученных при каждом запуске трубы с использованием комбинации гелий–CO₂, записанные кривые со ступенькой температуры поверхности, а также величины теплового сопротивления среды, полученные в экспериментах с CO₂ (B_{R5}), использовались для того, чтобы определить из полученных данных величину теплового произведения изготовленных термосенсоров. Это сделано для того, чтобы возможно было наиболее точно определить величину теплового произведения всех изготовленных термосенсоров. Для экспериментов, в которых использовались сенсоры, контакт которых изготовлен с использованием лезвия скальпеля, величины теплового произведения сенсора, определенные в каждом запуске трубы, показаны на рис. 7. Согласно нашим наблюдениям, в тех случаях, когда контакт был сформирован на алюмелевом элементе, средние величины теплового произведения для запусков, выполненных с сенсорами KS20A и KS60A, варьировали от 11009,26 до 11190,01 Дж/м²·К·сек^{1/2}. Эти величины близки к величине теплового сопротивления для алюминия, которая была оценена из полученных нами корреляционных соотношений. Однако в тех случаях, когда контакт сформирован на хромелевом элементе, средние величины теплового произведения, определенные в запусках трубы с сенсорами KS40C и KS60C, варьировали от 9264,02 до 9270,11 Дж/м²·К·сек^{1/2}. Хотя последние величины близки между собой, они превышают величину теплового сопротивления для хромаля, найденную из корреляционных соотношений. Следует отметить, что



процедура определения теплового произведения из измеренных данных проявляет некоторую чувствительность к величине разности

Рис. 8. Зависимость теплового произведения сенсора от энтальпии для нескольких термосенсоров, сформированных после обработки контактных поверхностей наждачной бумагой. KA80A (1), KA150C (2), KA320AC (3), KA600AC (4), KA1000AC (5), KA1500AC (6).

температур при определении величины теплового производства углекислого газа. Таким образом, неопределенность в величине разности температур оценивается как $\pm 1,2\%$, а оценочная неопределенность в величине теплового производства сенсора составляет примерно $\pm 2,8\%$, причем самый большой вклад вносит ошибка в определении теплового производства CO_2 . Следовательно, указанный уровень неопределенности может вносить вклад в величину разности между измеренной и определенной из корреляционных соотношений величинами теплового производства для хромеля. Далее, следует обратить внимание еще на одно обстоятельство, состоящее в том, что термосенсор в действительности образован тремя различными материалами, которые вносят вклад в величину теплового производства (см. [21]). Помимо этого, кажется, что некоторые из изготовленных контактов располагались в области, расположенной ближе к алюмелевому элементу, в то время как другие контакты были расположены ближе к области электрической изоляции сенсора. Поэтому разница между величинами теплового производства контактов, изготовленных с применением лезвия скальпеля для нанесения царапин на алюмелевые и хромелевые элементы, хорошо согласуется с данными для всех экспериментально изученных сенсоров с контактами, изготовленными с помощью лезвия скальпеля. Возможно, эти результаты свидетельствуют о том, что процедура калибровки каждого термосенсора могла не являться необходимой для определения величины теплового производства сенсора. Поэтому, основываясь на результатах настоящей работы, в качестве величины теплового производства для сенсора, контакт которого сформирован на алюмелевом элементе, мы можем принять значение $11099,64 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{сек}^{1/2}$ с доверительным интервалом $\pm 4,18\%$ для вероятности 95% . В то же время для сенсора, контакт которого сформирован на хромелевом элементе, в качестве величины теплового производства может быть принято значение $9267,06 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{сек}^{1/2}$ с доверительным интервалом $\pm 1,82\%$ для вероятности 95% .

Несколько другая ситуация имеет место в том случае, когда контакт термосенсора изготавливается с применением наждачной бумаги. Рассмотрим случай сенсора КА80А, для изготовления которого применялась наждачная бумага с самым большим размером зерна, и при этом перенос вещества осуществлялся с хромелевого элемента на алюмелевый. В этом случае множественные контакты были образованы посредством аккуратного потирания небольшой области с размером, равным размеру зерна наждачной бумаги, с переносом вещества с хромелевого на алюмелевый элемент, так что все локальные термодинамические переходы образовывались на алюмелевом элементе. Средняя величина теплового производства составила $10561,56 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{сек}^{1/2}$, т. е. оказалась явно меньше величины теплового производства сенсора, изготовленного с применением лезвия скальпеля (то есть сенсоров КS20А и КS60А). В случае, когда контакт сенсора изготовлен с использованием наждачной бумаги с гораздо меньшим размером зерна (сенсоры КА600АС, КА1000АС и КА1500АС), эффективно термодинамические переходы располагались гораздо ближе к слою изоляции по сравнению со случаем сенсоров, изготовленных с помощью лезвия скальпеля. В этом случае наждачная бумага относительно большой площади протягивалась по всему торцу термосенсора, вероятно, потому, что переходы образовывались как на алюмелевом, так и на хромелевом элементе. Число контактов на каждом элементе термосенсора могло различаться, поэтому возможно, что тепловое производство одного из материалов элементов могло доминировать. Кроме того, теплофизические свойства слоя изоляции оказывают более сильное влияние на эффективные величины теплового производства в том случае, когда при помощи наждачной бумаги формируются контакты меньшего размера. Таким образом, в качестве среднего для величины теплового производства указанных выше трех сенсоров мы можем принять значение

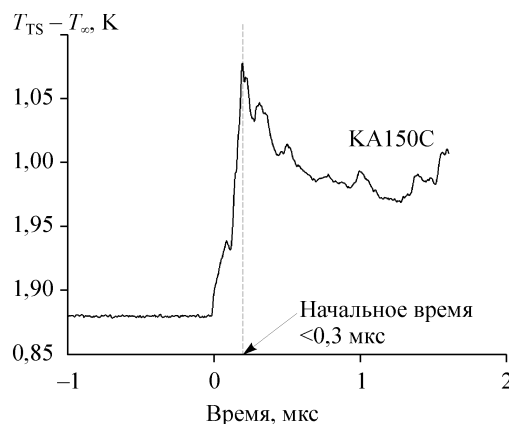
11289,02 Дж/м²·К·сек^{1/2} с доверительным интервалом ±6,32 % для вероятности 95 % даже тогда, когда имеют место небольшие вариации этих величин, как это показано на рис. 8. Наблюдаемые вариации величин теплового произведения контактов термосенсора вызваны различием теплофизических свойств материалов двух элементов сенсора в сочетании с неопределенностью масс этих материалов и различиями в степени близости контакта к слою изоляции, вызванными различиями в структуре сенсора.

Время нарастания сигнала сенсора

Рассмотрим особенности кинетики возрастания температуры поверхности, проиллюстрированные на рис. 6 для нескольких термосенсоров, изготовленных с применением различных способов нанесения царапин на контактные поверхности. Результаты показывают, что небольшое изменение уровня температуры имеет место к моменту времени спустя 5 мкс после отражения ударной волны; поэтому для анализа настоящих результатов использовался более консервативный подход. Для того, чтобы идентифицировать ступеньку на каждой кривой температуры поверхности, записанный сигнал с конкретного термосенсора усреднялся на временном интервале от 0 до 2 мкс после отражения ударной волны. Примеры сигналов, полученных для выбранных термосенсоров за временной период до 2 мкс после отражения ударной волны, показаны на рис. 9 и 10, по этим данным можно определить время нарастания сигнала изготовленного сенсора.

Мы заметили, что время нарастания сигнала термосенсора с контактом, изготовленным с использованием наждачной бумаги, составляло менее 0,3 мкс (см. рис. 9). Этот рисунок показывает время нарастания сигнала термосенсора, изготовленного с использованием наждачной бумаги с большим размером зерна 150#. Между тем некоторые термосенсоры проявляли немного большие времена нарастания сигнала, чем 0,3 мкс, например, сенсор КА320АС, который был изготовлен с использованием наждачной бумаги с размером зерна 320#; увеличение времени нарастания сигнала сенсора в последнем случае связано с худшим отношением сигнал/шум при записи кривых температуры поверхности. Таким образом, кажущаяся величина теплового произведения для этого термосенсора намного больше, и наблюдается больший диапазон величин теплового произведения для сенсора КА320АС (в пределах 9,61 %) по сравнению с таким же диапазоном для сенсора КА80А (в пределах 4,54 %). Опыты в ударной трубе показали, что некоторые из термосенсоров, изготовленных с использованием лезвия скальпеля для нанесения царапин на контактные поверхности, имели время нарастания сигнала менее 0,3 мкс (см. рис. 10). Между тем, другие термосенсоры имели время нарастания сигнала примерно равное 0,3 мкс, как, например, сенсор KS20А, это было связано с худшим отношением сигнал/шум у этого термосенсора. Таким образом, кажущаяся величина теплового произведения оказывалась выше, а величины теплового произведения сенсора KS20А имели больший диапазон

Рис. 9. Время нарастания показаний термосенсора, сформированного после обработки контактных поверхностей наждачной бумагой.



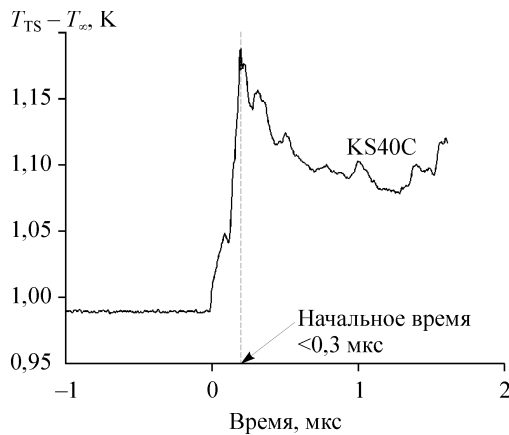


Рис. 10. Время нарастания показаний термосенсора, сформированного после обработки контактных поверхностей лезвием скальпеля.

(10,26 %) по сравнению с сенсором KS60A (1,02 %). Помимо всего прочего, это могло быть следствием того обстоятельства, что указанные термосенсоры изготавливались вручную, и это могло приводить к существенному разбросу эффективных глубин контакта, который прямо влияет на величину времени нарастания сигнала термосенсора.

АНАЛИЗ ВОСПРОИЗВОДИМОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОШИБОК

Все термосенсоры, использованные в этой работе, изготовлены из одной партии исходных материалов. Воспроизводимость данных измерений для каждого типа термосенсора была на уровне $\pm 5\%$. Кроме того, мы оценивали повторяемость результатов процедуры калибровки с использованием данных, полученных в пробных запусках трубы 1–6 (см. табл. 2), которые представляли собой повторные эксперименты, выполненные в одной и той же конфигурации. Согласно данным, полученным для сенсора KA80A/R*, запуски трубы 1–6 дают в качестве среднего значения теплового произведения величину $B_{ал} = 11748,63 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{сек}^{1/2}$ со стандартным отклонением, равным $5,02\%$. Этот диапазон изменения существенно превышает оцененную неопределенность, показывая тем самым, что наибольший вклад в вычисленную величину $(T_{TS} - T_{\infty})$ дают измеренная скорость ударной волны (неопределенность $\pm 0,5\%$) и коэффициент теплопроводности углекислого газа (неопределенность $\pm 2\%$), что в сумме дает неопределенность $\pm 2,5\%$. Различие в данных, полученных в повторных запусках, находилось в пределах $\pm 2\%$. Поэтому суммарная неопределенность была оценена из данных, полученных во всех запусках трубы и для всех значений высокого давления P_4 , низкого давления P_1 , скорости ударной волны u , скорости отраженной волны U_R и температуры поверхности $(T_{TS} - T_{\infty})$ с использованием метода, описанного в [34, 35]. В наших экспериментах найдено, что полная погрешность в измеренных значениях статического и динамического значений проистекает из неточности калибровки, составляющей около $\pm 2\%$, разброса между повторными запусками трубы, составляющего $\pm 2\%$, неточностей усиления и выборки (обе $\pm 1\%$) и погрешности в определении базовой линии давления ($\pm 2\%$ для статического давления и пренебрежимо малая величина для динамического давления), что приводит к полной ошибке приблизительно $\pm 5\%$ в определении статического давления и к ошибке $\pm 3\%$ в определении динамического давления. Ошибка в определении теплового потока обусловлена неопределенностью теплофизических свойств элементов термосенсора ($\pm 4\%$), неопределенностью терморезистивных характеристик элементов ($\pm 2\%$), разброса между запусками трубы ($\pm 2\%$), а также погрешностями усиления и выборки (обе $\pm 1\%$), что в сумме составляет погрешность приблизительно $\pm 5\%$.

ВЫВОДЫ

Для определения величины теплового произведения термосенсоров использовалась экспериментальная методика калибровки сенсоров в ударной трубе кратковременного действия с различными условиями. Время отклика сенсоров было менее 50 мкс со временем нарастания менее 0,3 мкс. Исследовалось также влияние различных способов нанесения царапин на контактные поверхности на тепловое произведение сенсоров. В работе были получены практически полезные данные о величинах теплового произведения термосенсоров с поцарапанными контактными поверхностями. Эти данные будут полезны экспериментаторам; они могут быть использованы для проведения точных измерений нестационарных тепловых потоков. Величина теплового произведения существенно зависела от способа формирования контакта поверхностей конкретного сенсора. Точная величина теплового произведения зависела от того, был ли переход расположен на положительном или отрицательном элементе, или на обоих элементах, или в окрестности тонкого изолирующего слоя между двумя элементами. Величина теплового произведения зависела также от числа Маха, от способа нанесения царапин на контактные поверхности и от энтальпийных условий. Обнаружено, что термосенсор, изготовленный с применением скальпельного лезвия определенного размера, проявляет разумные величины теплового произведения, не требуя, таким образом, индивидуальной калибровки. Между тем, датчики, контактные поверхности которых были обработаны наждачной бумагой с разным размером зерна, скорее всего потребуют калибровки. Имеется явное различие между величинами теплового произведения контактов, сформированных на хромелевом и алюмелевом элементах с использованием лезвия скальпеля в качестве инструмента для нанесения царапин. Тепловое произведение алюмеля превышает величину теплового сопротивления хромеля приблизительно на 17,33 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Alkidas A.C.** Heat transfer characteristics of a spark ignition engine // *J. of Heat Transfer*. 1980. Vol. 102. P. 189–193.
2. **Alkidas A.C., Cole R.M.** Transient heat flux measurements in a divided chamber diesel engine // *J. of Heat Transfer*. 1985. Vol. 107. P. 439–444.
3. **Alkidas A.C., Puzinauskas P.V., Peterson R.C.** Combustion and heat transfer studies in a spark-ignited multi-valve optical engine // *SAE Trans. J. of Engng.* 1990. Vol. 99. P. 817–830.
4. **Gatowski J.A., Smith M.K., Alkidas A.C.** An experimental investigation of surface thermometry and heat flux // *Exper. Therm. Fluid Sci.* 1989. Vol. 2. P. 280–289.
5. **Lawton B.** Effect of compression and expansion on instantaneous heat transfer in reciprocating internal combustion engines // *Proc. Inst. Mech. Engng., Part A: J. of Power and Energy*. 1987. Vol. 201. P. 175–186.
6. **Nijeweme Oude D.J., Kok J.B.W., Stone C.R., Wyszynski L.** Unsteady in-cylinder heat transfer in a spark ignition engine: experiments and modeling // *Proc. Inst. Mech. Engng., Part D: J. of Automobile Engng.* 2001. Vol. 215. P. 747–760.
7. **Jessen C., Vetter M., Gronig H.** Experimental studies in the Aachen hypersonic shock tunnel // *Z. Flugwiss Weltraumforsch.* 1993. Vol. 17. P. 73–81.
8. **Gai S.L., Joe W.S.** Laminar heat transfer to blunt cones in high-enthalpy flows // *J. Thermophysics Heat Transfer*. 1992. Vol. 6. P. 433–438.
9. **Sanderson S.R., Sturtevant B.** Transient heat flux measurement using a surface thermocouple // *Review of Scientific Instruments*. 2002. Vol. 73, No. 7. P. 2781–2788.
10. **Lawton B., Klingenberg G.** *Transient Temperature in Engineering and Science*. Oxford University Press, Oxford. 1996.
11. **Chen J.C., Hsu K.K.** Heat transfer during liquid contact on superheated surfaces // *J. of Heat Transfer*. 1995. Vol. 117. P. 693–697.
12. **Lee L., Chen J.C., Nelson R.A.** Surface probe for measurement of liquid contact in film transition boiling on high temperature surfaces // *Review of Scientific Instruments*. 1982. Vol. 53, No. 9. P. 1472–1476.
13. **Lee L.Y.W., Chen J.C., Nelson R.A.** Liquid-solid contact measurements using a surface thermocouple temperature probe in atmospheric pool boiling water // *J. of Heat Mass Transfer*. 1985. Vol. 28. P. 1415–1423.

14. **Bendersky D.** A special thermocouple for measuring transient temperatures // *Mech. Engng.* 1953. Vol. 75, No. 2. P. 117–121.
15. **Kovas A., Mesler R.B.** Making and testing small surface thermocouples for fast response // *Review of Scientific Instruments.* 1964. Vol. 35, No. 4. P. 485–488.
16. **Ongkiehong L., Van Dujin J.** Construction of a thermocouple for measuring surface temperatures // *J. Sci. Instr.* 1960. Vol. 37. P. 221–222.
17. **Mohammed H., Salleh H., Yusoff M.Z.** Design and fabrication of coaxial surface junction thermocouples for transient heat transfer measurements // *Inter. Comm. Heat Mass Transfer.* 2008. Vol. 35, No. 7. P. 853–859.
18. **Mohammed H.A., Salleh H., Yusoff M.Z.** Fast response surface temperature sensor for hypersonic vehicles // *Instrum. Experimental Technique.* 2010. Vol. 53, No. 1. P. 153–159.
19. **Kinzie P.A.** Thermocouple Temperature Measurement. John Wiley & Sons Inc. New York, 1973.
20. **Raznjevic K.** Handbook of Thermodynamics Tables and Charts. Mc-Graw Hill. New York, 1976.
21. **Mohammed H., Salleh H., Yusoff M.Z.** The transient response for different types of erodable surface thermocouples using finite element analysis // *Thermal Science.* 2007. Vol. 11, No. 4. P. 49–64.
22. **Buttsworth D.R.** Assessment of effective thermal product of surface junction thermocouples on millisecond and microsecond time scales // *Exper. Therm. Fluid Sci.* 2001. Vol. 25, No. 6. P. 409–420.
23. **Nanmac.** Temperature Measurement Handbook, Vol. VIII. Framingham, MA: Nanmac Co. Publication, 1997.
24. **Heichal Y., Chandra S., Bordatchev E.** A fast response thin film thermocouple to measure rapid surface temperature changes // *Exper. Therm. Fluid Sci.* 2005. Vol. 30, No. 2. P. 153–159.
25. **Sprinks T.** On the calibration of calorimeter heat transfer gauges // *AIAA J.* 1963. Vol. 1, No. 2. P. 464–468.
26. **Lyons P.R.A., Gai L.** A method for the accurate determination of the thermal product $(\rho c k)^{1/2}$ for thin film heat transfer or surface thermocouple gauges // *J. Phys. E: Sci Instrum.* 1998. Vol. 21. P. 445–448.
27. **Caldwell F.R.** Thermocouple materials / C.W. Herzfeld (Ed.) // *Applied Methods and Instrument; Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry.* 1962. Vol. 3. Part 2. Reinhold. New York. P. 81–134.
28. **Touloukian Y.S.** Specific heat metallic elements and alloys / Y.S. Touloukian (Ed.) // *Thermophysical Properties of Matter; TPRC Data series, Vol. 4, IFI/Plenum press.* New York. 1970.
29. **Touloukian Y.S.** Thermal Conductivity Metallic Elements and Alloys / Y.S. Touloukian (Ed.), *Thermophysical Properties of Matter; TPRC Data series, Vol. 1. IFI/Plenum Press.* New York. 1970.
30. **Anderson J.D.** Modern compressible flow with historical perspective / 3rd ed. Mc-Graw Hill. New York. 2004.
31. **Zurcow M.J., Hoffman J.D.** Gas dynamics. John Wiley & Sons Inc. New York. 1976.
32. **White F.M.** Viscous Fluid Flow / 2nd ed. Mc-Graw Hill. New York. 1991.
33. **Vargaftik N.B., Vinogradov Y.K., Yargin V.S.** Handbook of physical properties of liquids and gases / 3rd ed. Begell House. New York. 1996.
34. **Coleman H.W., Steele W.G.** Engng application of experimental uncertainty analysis // *AIAA J.* 1995. Vol. 33. P. 1888–1896.
35. **Baines N.C., Mee D.J., Oldfield M.L.G.** Uncertainty analysis in turbomachine and cascade testing // *Inter. J. of Engng Fluid Mechanics.* 1991. Vol. 4, No. 4. P. 375–401.

*Статья поступила в редакцию 28 ноября 2009 г.,
после переработки 1 апреля 2010 г.*