

УДК 536.532:004.942

В. И. Томак, В. А. Чернов,
Т. В. Боровкова, В. Н. Елисеев

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ ТЕРМОПАРНЫМИ ДАТЧИКАМИ

Приведены результаты оценки достоверности измерения температуры высокоскоростного потока газа с помощью термопар с закрытым спаем. С использованием метода конечных элементов проведена численная оценка вклада основных составляющих погрешности, обусловленных скоростью газа, теплоотводом и излучением. Предложена методика, которая позволит определить температуру газа с помощью термопар с защитными чехлами.

Определение с высокой степенью достоверности температуры высокоскоростных газовых потоков в тепловых аппаратах с помощью термопарных датчиков всегда являлось сложной задачей. Известно, что непосредственно измерить температуру среды невозможно, хотя ее значение можно определить по другим физическим параметрам, зависящим от температуры. Такими параметрами могут быть объемы тел, их длина, электрическое сопротивление, термо-ЭДС и т.д. При измерении температуры среды происходит передача тепловой энергии от среды с более высокой температурой к менее нагретому датчику. В этом случае показания термодатчика зависят от скорости газа, его температуры, вязкости, состава газа, а также от размеров самого датчика, его конструкции, способа крепления и т.д. Поэтому температура термодатчика никогда не может быть равна температуре газового потока, которую надо измерить. Обычно абсолютной погрешностью измерений называют разность между показаниями измерительной системы и действительной температурой среды.

На практике для измерения температуры газа широко применяются термопары с открытым спаем. Датчики такого типа имеют небольшую постоянную времени и высокую точность (рис. 1, а). Но при измерении температур продуктов сгорания топлив, содержащих агрессивные компоненты, или газовых потоков, содержащих твердые частицы размером до десятков микрон и более, такие термопары быстро выходят из строя. В этих случаях для защиты датчика спай термопары закрывают различными чехлами. Один из типов защиты

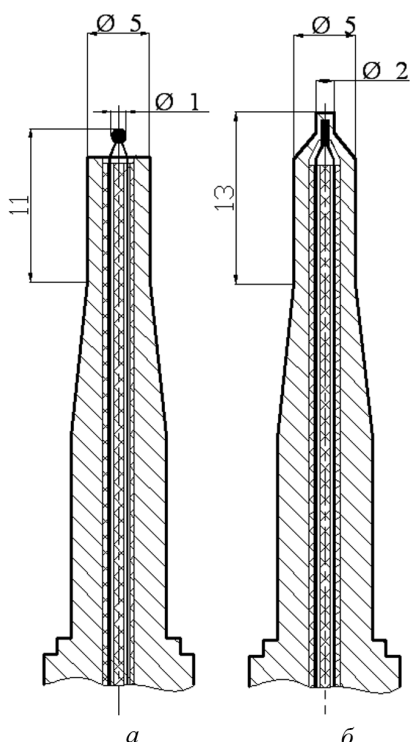


Рис. 1. Термопара с открытым (а) и закрытым (б) спаем

приведен на рис. 1, б, где спай термопары вварен в наконечник металлического чехла.

Цель настоящей работы — оценить достоверность измерения температуры высокоскоростного газового потока термопарами с защищенным спаем.

Поскольку датчики различных типов измеряют температуру, отличающуюся от температуры торможения потока, за абсолютную погрешность измерения принята разность температур

$$\Delta_{\Sigma} = T_{\text{торм}} - T_{\text{д}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{торм}}$ — расчетное значение температуры заторможенного потока; $T_{\text{д}}$ — экспериментальное значение температуры, измеряемое датчиком с открытым спаем.

Экспериментальное исследование. Для получения высокоскоростного потока газа использовали установку газогенераторного типа (рис. 2),

состоящую из камеры сгорания, в которую подавались горючее (керосин) и окислитель (воздух), и соплового блока. Смесь воспламенялась

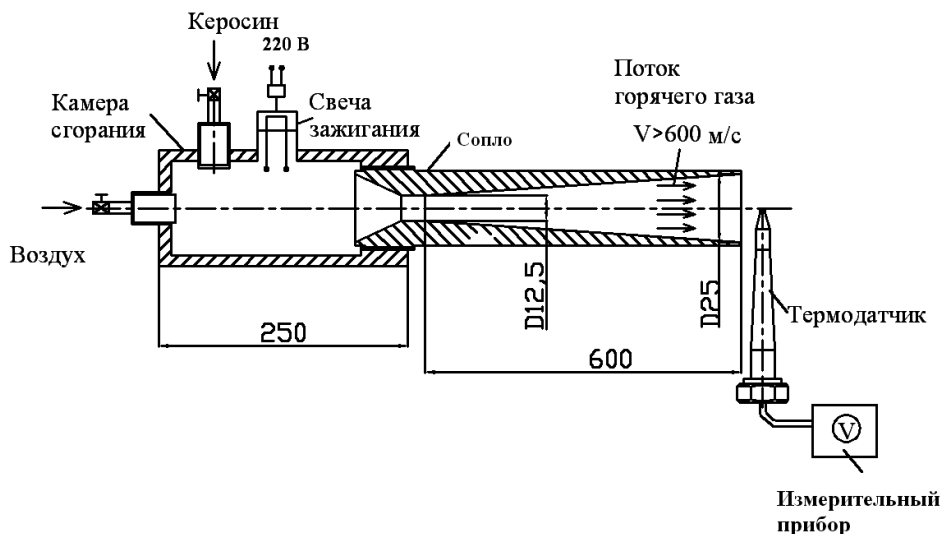


Рис. 2. Схема рабочего участка установки (системы подачи и регулирования компонентов топлива не показаны)

с помощью свечи зажигания. Установка позволяет изменять параметры газового потока (температуру, скорость, давление и т.д.) в широких пределах вследствие изменения расходов компонентов топлива и их соотношений. Температура потока измеряется с помощью термодатчика и измерительного прибора.

Для измерения температуры газового потока применялись датчики двух типов (см. рис. 1). В каждом из них чувствительным элементом является хромель-алюмелевая термопара, представляющая собой два термоэлектрода диаметром 0,5 мм. Для предотвращения контакта термоэлектродов они проложены внутри двухканальной керамической соломки, которая одновременно служит теплоизоляцией от металлического чехла (рис. 3). В обоих случаях прибор измеряет термо-ЭДС термопары, которая зависит от температуры спая.

Разработка методики определения температуры газа с помощью термопары в чехле. Основными факторами, влияющими на температурное поле термопары с закрытым спаем, являются: воздействие высокоскоростного газового потока, отвод теплоты по металлическому чехлу термопары и излучение. Для определения температуры высокоскоростного потока газа по показаниям термопары в чехле необходимо весьма точно определить параметры окружающей среды, чтобы рассчитать необходимую поправку Δ_{Σ} .

Погрешность измерения температуры, связанная со скоростью потока, представляет собой разность температур торможения и восстановления потока:

$$\Delta_V = T_{\text{торм}} - T_e,$$

и определяется по формуле

$$\Delta_V = (1-r) \frac{[(k-1)/2] M^2}{1 + [(k-1)/2] M^2} T_{\text{торм}}, \quad (2)$$

где r — коэффициент восстановления; k — показатель адиабаты; M — число Маха; T_e — температура восстановления.

В первом приближении примем $T_{\text{торм}}$ равной значению температуры T_d , измеренному термопарой в чехле.

Поскольку значение r существенно влияет на Δ_V , то необходимо обоснованно подходить к выбору этого коэффициента. В рабо-

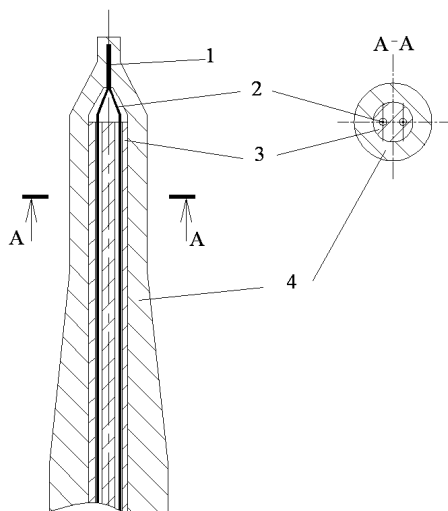


Рис. 3. Конструкция термопары с закрытым спаем:

1 — спай; 2 — термоэлектроды; 3 — керамическая соломка; 4 — металлический чехол

те [1] приведены экспериментальные данные, позволяющие определить r в условиях поперечного обтекания для самых распространенных значений диаметров термопары в чехле, с учетом числа Маха и температуры свободного потока. Для умеренных скоростей и низких температур ($M \leq 1$, $T_{\text{потока}} = 21^\circ\text{C}$) коэффициент восстановления приблизительно равен 0,6, а при повышении скорости и температуры ($M \geq 1,26$, $T_{\text{потока}} \geq 500^\circ\text{C}$) находится в пределах 0,65...0,8.

Погрешность вследствие теплоотвода по корпусу термопары рассчитывается по приближенной формуле

$$\Delta_C = \frac{T_{\text{горм}} - T_{\text{п}}}{\text{ch } L(4\alpha/\lambda_T d)^{1/2}}, \quad (3)$$

где $T_{\text{п}}$ — температура неподвижного газа в точке ввода корпуса термодатчика в поток, К; L — длина участка термопары, омываемого потоком горячего газа (в дальнейшем будем называть рабочим участком), м; α — коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К); λ_T — коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м·К); d — диаметр тела, м. Значение $T_{\text{п}}$ выбирается равным 293 К, так что экспериментатор без опасений может держать рукой корпус термопары. В качестве коэффициента λ_T используется его эффективное значение, рассчитанное как среднее для соответствующих значений материалов термоэлектродов, керамической соломки и чехла. Значение теплопроводности для каждого материала при суммировании умножается на коэффициент, показывающий, какой процент площади поперечного сечения термопары в чехле занимает этот материал. Характерный размер датчика при расчете теплоотвода d определяется как средний диаметр той части чехла датчика, которая омывается потоком газа (3,5 мм).

Значение коэффициента теплоотдачи для термодатчика в чехле рассчитано с использованием обобщенной зависимости [2]:

$$\text{Nu} = 0,0296 \text{Pr}^{0,43} \text{Re}^{0,8} \left(\frac{T_{\text{пов}}}{T_e} \right)^{0,4} \left(1 + r \frac{k-1}{2} M^2 \right)^{0,11}, \quad (4)$$

где $\text{Nu} = \alpha d/\lambda_{\text{сп}}$; $\lambda_{\text{сп}}$ — теплопроводность газа, Вт/(м·К); Pr — число Прандтля; Re — число Рейнольдса; $T_{\text{пов}}$ — температура поверхности датчика, К; T_e — температура восстановления, К.

Для определения скорости потока использовалась формула из работы [3]:

$$V = \sqrt{2RT_2 \frac{k}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]}, \quad (5)$$

где R — универсальная газовая постоянная; T_2 — температура в камере сгорания; p_3 — давление на срезе сопла, Па; p_2 — абсолютное давление в камере, Па.

В результате получено выражение для коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\text{Nu}\lambda_{\text{cp}}}{d} = \frac{0,0296 \text{Pr}^{0,43} \text{Re}^{0,8} \left(\frac{T_{\text{нов}}}{T_e}\right)^{0,4} \left(1 + r\frac{k-1}{2} \text{M}^2\right)^{0,11} \lambda_{\text{cp}}}{d}. \quad (6)$$

Учесть влияние лучистого теплового потока на величину погрешности измерения температуры можно, используя формулу [1]

$$\Delta_R = \sigma \varepsilon T_{\text{д}}^4 / \alpha, \quad (7)$$

где σ — постоянная Стефана–Больцмана; ε — степень черноты поверхности.

Для повышения точности и, одновременно, упрощения расчета потерь от теплоотвода по металлическому чехлу и от излучения с поверхности используется программный комплекс Nastran, в котором реализован метод конечных элементов (МКЭ). Приведем основные этапы построения и расчета модели термопарного датчика с помощью этой программы: построение геометрической модели термопары в чехле; разбиение модели на конечные элементы (КЭ); приложение тепловых нагрузок к модели.

Геометрическая и КЭ-модель термопары в чехле. При моделировании сложной геометрии термопары в чехле применялись конечные элементы в виде тетраэдров. Выбор КЭ такой формы обусловлен достаточной точностью моделирования процессов и более высокой устойчивостью при расчете по сравнению с КЭ в виде параллелепипеда.

Учет симметрии датчика позволил сократить время расчета и количество рассматриваемых КЭ: модель представляет собой половину реального объекта нагрева. При моделировании также учитывался вклад термоэлектродов и электроизоляции в отвод теплоты от спая. В расчете принято допущение, что спай зачеканен в металлический чехол без зазора.

Модель термопары с указанием материалов, описанием приложенных тепловых нагрузок и расположением контрольной точки T_1 (в этой точке условно расположен спай термопары), в которой определялись значения температуры, показаны на рис. 4.

Коэффициент конвективной теплоотдачи для термопары в чехле рассчитывался по формуле (6).

Модель обтекания. Для моделирования распределения температур на поверхности датчика использовались результаты экспериментальных исследований по определению температуры поверхности цилиндра, приведенные в работе [4]. Температура в передней точке цилиндра (точка 1 на рис. 5) принималась равной температуре торможения $T_{\text{торм}}$. В работе [4] показано, что температура в точке 2

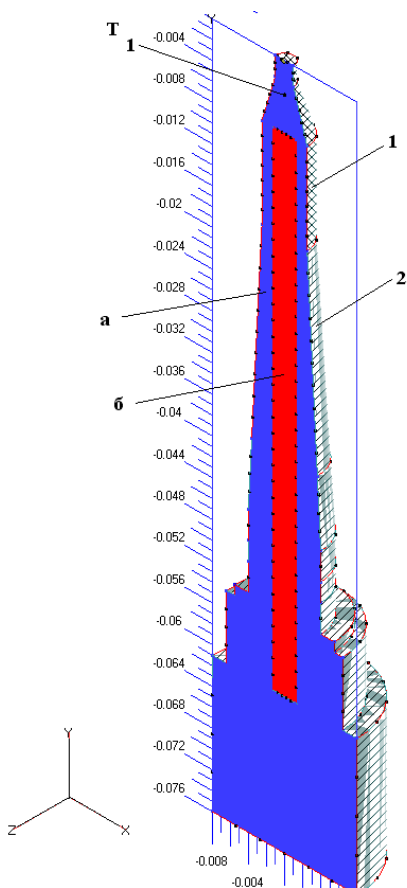


Рис. 4. Модель термопары с закрытым спаем:

а — металлический чехол (сталь Х18Н10Т); *б* — электроизоляция термоэлектродов (керамика); 1 — конвективный тепловой поток и поток собственного излучения; 2 — естественное охлаждение конвекцией и излучением; T_1 — температура спая термопары

программы Nastran являлась возможность учитывать непостоянство коэффициента теплоотдачи и температуры среды по поверхности датчика в осевом и окружном направлениях. При расчете рассматривался случай проведения измерений температуры газа в точке пересечения условных продольных осей термопары и сопла (точка *А* на рис. 6), поэтому длина рабочего участка термопары, омываемого горячим газом, при моделировании принималась равной 12,5 мм (радиус сопла). В этой области (см. поз. 1 на рис. 4) коэффициент конвективного теплообмена и температура среды принимались постоянными в осевом направлении. В окружном направлении на поверхности чехла условно заданы две зоны — область набегающего потока и застойная область.

практически совпадает с $T_{\text{торм}}$, а температура в точке, расположенной под углом 95° от точки 2 (точка 3 на рис. 5), отличается от нее менее чем на 2%.

Таким образом, с достаточной точностью принимаем, что для расчета температурного поля поверхность термопарного датчика в металлическом чехле можно условно разделить на две зоны, в первой из которых (обращена к набегающему потоку) температура среды равна $T_{\text{торм}}$. Вторая зона (остальная часть окружности) носит условное название “застойная область потока”, температура среды в ней рассчитывается по формуле из работы [2]:

$$T_{\text{заст.обл}} = T_{\text{своб.потока}} = T_{\text{торм}} - \frac{V^2}{2C_p} \quad (8)$$

На рис. 5 для каждой из областей указана температура среды, необходимая при расчете конвективного потока теплоты к поверхности чехла термопары. Периметры областей, имеющих температуру $T_{\text{торм}}$ и $T_{\text{заст.обл}}$ соотносятся как 53 % и 47 % соответственно.

Граничные и начальные условия. Особенностью моделирования граничных условий с помощью про-

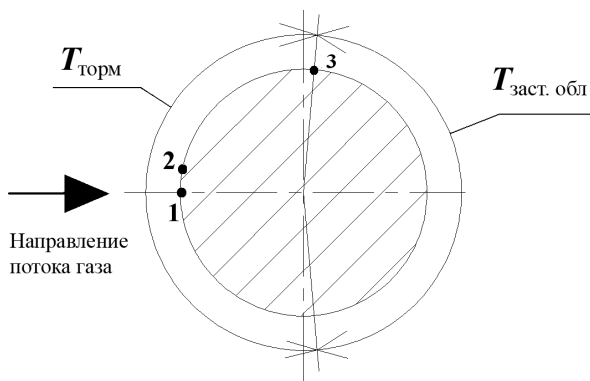


Рис. 5. Схема распределения температур в окружном направлении на поверхности цилиндра, обтекаемого в поперечном направлении

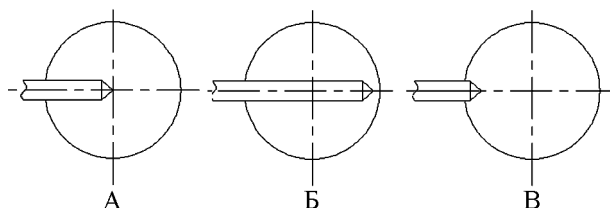


Рис. 6. Схема расположения контрольных точек:

А — в точке пересечения продольных осей термопары и сопла; Б — у противоположного среза сопла (термопара лежит в плоскости, параллельной срезу сопла); В — у ближнего края среза сопла (термопара лежит в плоскости, параллельной срезу сопла)

В них температура среды равна $T_{\text{торм}}$ и $T_{\text{заст. обл}}$ соответственно, а коэффициент теплоотдачи определялся для каждой из температур по формуле (6). На поверхности датчика, находящейся за пределами сопла (см. поз. 2 на рис. 4), задан конвективный теплообмен с параметрами $\alpha^0 = 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $T_{\text{сп}}^0 = 293 \text{ К}$. На всех поверхностях датчика действует механизм собственного излучения (степень черноты всех наружных поверхностей датчика $\varepsilon = 0,85$).

В начальный момент времени температура термопары принята 293 К.

Таким образом, для определения температуры заторможенного потока по показаниям термопары с закрытым спаем необходимо:

1) измеренное термопарой в чехле значение температуры $T_{\text{д}}$ принять в первом приближении равным температуре торможения потока $T_{\text{торм}}$;

2) определить скорость потока газа и скоростную компоненту погрешности измерения температуры Δ_V ;

3) определить коэффициент теплоотдачи на рабочем участке термопары по формуле (6), построить КЭ-модель термопары в чехле, с ее помощью определить сумму $(\Delta_C + \Delta_R)$ как разность между температурой $T_{\text{торм}} = T_{\text{д}}$ и T_1 ;

4) определить значение суммарной погрешности Δ_{Σ} измерения температуры с помощью термопары в чехле;

5) определить действительную температуру торможения потока по формуле $T_{\text{дейст}} = T_{\text{д}} + \Delta_{\Sigma}$.

Выполненные расчеты показали, что коэффициент теплоотдачи не оказывает большого влияния на результаты расчета, поэтому необходимую для расчета температуру торможения принимаем равной $T_{\text{дейст}}$.

Анализ результатов расчета. По предложенной методике была проведена оценка достоверности определения температуры высокоскоростного газового потока с помощью термопарного датчика в чехле.

С помощью зависимости (2) и МКЭ был определен вклад каждого компонента в суммарную погрешность $\Delta_{\Sigma} = \Delta_V + \Delta_C + \Delta_R$. Полагая, что продукты сгорания по своим теплофизическим свойствам мало отличаются от воздуха и что в первом приближении $T_{\text{торм}} = T_{\text{д}} = 793$ К, получили значение $\Delta_{\Sigma} = 67 + 22 + 10 = 99$ К. Тогда действительное значение температуры $T_{\text{дейст}} = 793 + \Delta_{\Sigma} = 892$ К.

На экспериментальной установке в тех же условиях были проведены измерения температуры газа термопарой без чехла (см. рис. 1, а). Установившаяся измеренная температура равна 893 К.

Форсированный режим работы установки позволил повысить температуру газа, измеряемую термопарой в чехле до $T_{\text{д}} = 933$ К. Аналогично принимаем в первом приближении $T_{\text{торм}} = T_{\text{д}}$, тогда $\Delta_{\Sigma} = 54 + 26 + 19 = 99$ К (при повышенной температуре $r \approx 0,8$). Полученный результат $T_{\text{дейст}} = 1032$ К хорошо согласуется с экспериментальными данными: температура, измеренная термодатчиком без чехла, в этом случае составила 1033 К.

Таким образом, экспериментальное исследование подтвердило правильность используемой методики расчета.

С помощью предложенной методики было проведено исследование влияния таких факторов, как длина рабочего участка и диаметр термопары на погрешность измерения. Из рис. 7 видно, что влияние L на величину Δ_{Σ} наиболее сильно проявляется на участке $L = 0,005 \dots 0,012$ м: уменьшение длины рабочего участка приводит к резкому (трехкратному) росту погрешности. Влияние температуры потока на суммарную погрешность также наиболее ярко выражено на участке $L = 0,005 \dots 0,012$ м. Поэтому при проведении измерений термопарой в чехле надо по возможности выдерживать длину рабочего участка не менее 0,012 м. В таблице приведены значения каждой погрешности для двух режимов нагрева при разных L . Обращает на себя внимание тот факт, что при $L = 0,012 \dots 0,024$ м основной вклад в Δ_{Σ} вносит Δ_V . Однако при уменьшении длины рабочего участка значительно возрастает погрешность Δ_C , отражающая вклад потерь

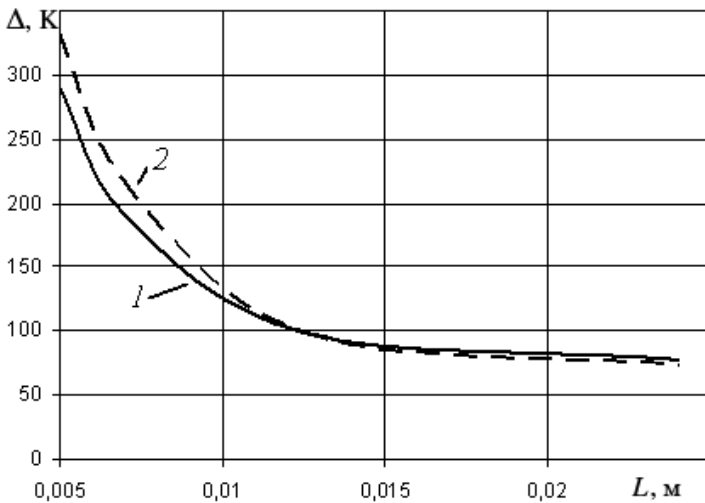


Рис. 7. Зависимость суммарной погрешности Δ_{Σ} от длины рабочего участка L для газового потока с температурой $T_d = 793$ К (1) и 933 К (2)

в отвод теплоты по чехлу. В связи с этим можно рекомендовать при проведении измерений в таких неблагоприятных условиях (малая длина L) использовать термопары с меньшим диаметром и меньшей теплопроводностью чехла (например, из углепластика).

Таблица

Значения погрешностей измерения температуры газового потока для двух температур T_d

Параметры рабочего участка термопары		Погрешности измерения, К				
		Δ_C	Δ_R	Δ_V	T_d	Δ_{Σ}
Длина L , м	0,005	214	10	67	793	291
	0,007	115	10	67	793	192
	0,0125	22	10	67	793	99
	0,024	0,643	10	67	793	77,64
	0,005	259	19	54	933	332
	0,007	143	19	54	933	216
	0,0125	26	19	54	933	99
	0,024	0,739	19	54	933	73,74
Диаметр d , м	0,002	6	10	67	793	83
	0,0035	22	10	67	793	99
	0,005	40,5	10	67	793	117,5
	0,002	7	19	54	933	80
	0,0035	26	19	54	933	99
	0,005	49	19	54	933	122

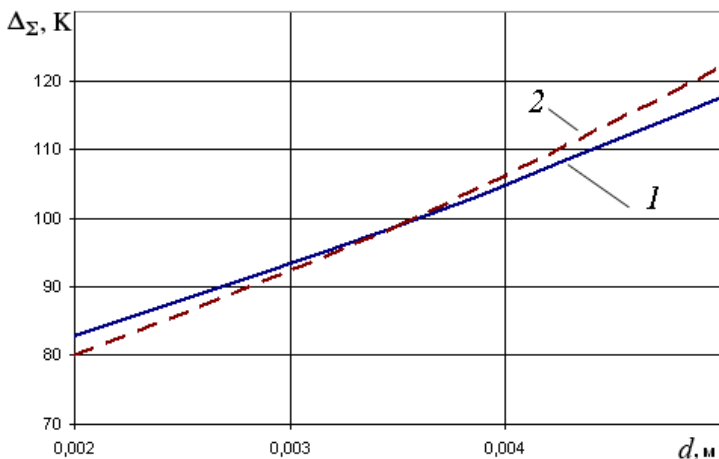


Рис. 8. Зависимость суммарной погрешности измерения температуры с помощью термопарного датчика с закрытым спаем от среднего диаметра рабочего участка чехла и температуры среды T_d

На рис. 8 представлена зависимость погрешности от среднего (на рабочем участке) диаметра термопары. Этот диаметр определялся как среднее арифметическое максимального и минимального диаметров наружных поверхностей термопары, омываемых горячим газом. На рис. 8 видно, что увеличение наружного диаметра чехла и, соответственно, толщины его сечения приводит к росту Δ_{Σ} . Причем изменение диаметра на погрешность влияет намного слабее, чем изменение L : при увеличении d в 2,5 раза Δ_{Σ} возросла только на 50 %.

Согласно данным таблицы изменение диаметра оказывает влияние только на Δ_C . Зависимость температуры среды наиболее заметно проявляется при использовании термопар, у которых средний диаметр $d \geq 0,005$ м: различие между Δ_{Σ} для разных T_d составляет в этом случае порядка 25 %.

Выводы. 1. На основе численной оценки погрешности определения температуры газового потока установлено, что термопара в чехле вносит погрешность в результаты измерений, составляющую 10...11 %.

2. С помощью предложенной методики было проведено исследование влияния на погрешность измерения таких факторов, как длина рабочего участка и диаметр термопары. При проведении измерений термопарными датчиками можно рекомендовать по возможности выдерживать длину рабочего участка не менее 12 мм. Учитывать влияние температуры газа на точность измерения имеет смысл только при наименее благоприятных условиях: диаметр чехла используемой термопары равен 5 мм, а глубина погружения датчика в поток менее 7 мм. Выбор термопары с более толстой стенкой чехла (3,75 мм вместо 1,25 мм при одинаковом диаметре электроизоляционной соломки) приведет к увеличению Δ_{Σ} на 20 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. М о ф ф а т Р. Д. Измерение температуры газа: Пер. с англ./ Измерение нестационарных температур и тепловых потоков. Сб. статей под ред. А.Н. Гордова. – М.: Мир, 1966. – 304 с.
2. И с а е в С. И., К о ж и н о в И. А., К о ф а н о в В. И. и др. Теория теплообмена: Учеб. для технических университетов и вузов / Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 683 с.
3. Д о б р о в о л ь с к и й М. В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: Учеб. для вузов / Ред. Д.А. Ягодников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 486 с.
4. Г о л у б е в А. Г., К а л у г и н В. Т. Электрокалориметрический метод исследования конвективной теплоотдачи в сверхзвуковом потоке / Сб. науч. трудов “Вопросы повышения уровня летной эксплуатации и безопасности полета воздушных судов”. – М.: Изд-во МГТУ ГА, 1996. С. 99–104.

Статья поступила в редакцию 19.03.2007

Виктор Иванович Томак родился в 1946 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1970 г. Канд. техн. наук., зав. отд. НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 10 изобретений и научных работ.

V.I. Tomak (b. 1946) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1970. Ph. D. (Eng.), head of department of “Power Engineering” research institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 10 inventions and publications.

Владимир Александрович Чернов родился в 1936 г., окончил Казанский авиационный институт в 1960 г. Канд. техн. наук., зам. зав. отд. НИИ ЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

V.A. Chernov (b. 1936) graduated from the Kazan Aviation Institute in 1960. Ph. D. (Eng.), deputy head of department of “Power Engineering” research institute of the Bauman Moscow State Technical University.

Татьяна Владимировна Боровкова родилась в 1981 г., окончила МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2004 г. Аспирантка кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области теплообмена в конструкциях летательных аппаратов.

T.V. Borovkova (b. 1981) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2004. Post-graduate of “Spacecrafts and Rocket-Launchers” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of heat exchange in constructions of flying vehicles.

Виктор Николаевич Елисеев родился в 1931 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1954 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Космические аппараты и ракеты-носители” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области теплообмена в конструкциях летательных аппаратов.

V.N. Yeliseev (b. 1931) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1954. D. Sc. (Eng.), professor of “Spacecrafts and Rocket-Launchers” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of heat exchange in constructions of flying vehicles.