

Т. В. Боровкова, В. Н. Елисеев,
И. И. Лопухов

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА СТЕНДЕ РАДИАЦИОННОГО НАГРЕВА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ НИЗКОТЕПЛОПРОВОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследовано влияние ряда параметров на методическую погрешность измерения температуры термодатчиком: плотности падающего теплового потока, неточности расположения термодатчика в пазу исследуемого элемента конструкции, теплофизических характеристик материала, заполняющего паз. Полученные результаты исследования позволяют повысить точность измерения температуры при проведении тепловых испытаний элементов конструкции.

При тепловых испытаниях элементов конструкции летательных аппаратов (ЛА) на стенде радиационного нагрева для контроля за воспроизведением температурного режима широко применяются термодатчики. В работах [1–3] приведены результаты исследований инструментальных погрешностей измерений температуры с помощью термодатчиков, обусловленных нелинейными теплофизическими свойствами, структурными превращениями и т.д. Подробное исследование методических погрешностей, возникающих в тонкостенной металлической конструкции при установке на поверхность привариваемых и приклеиваемых термодатчиков для различных условий нагрева, приведено в работе [4]. Однако при проектировании современных ЛА широко применяются керамические, композиционные, слоистые материалы, допускающие разнообразные способы установки контактных датчиков. Информация о методических погрешностях измерения температур в образцах таких материалов имеет отрывочный и несистематизированный характер.

Настоящая работа посвящена определению погрешности измерения температурного поля, возникающей при испытаниях на стенде радиационного нагрева образцов из композиционных материалов, которые допускают не только крепление термодатчика к поверхности (как для тонкостенной металлической конструкции), но и заделку датчиков в паз на некоторую глубину. Используемые в современных ЛА при высоких тепловых нагрузках композиционные материалы имеют теплопроводность на один-два порядка меньшую, чем у металлов, что приводит к возникновению большого градиента температуры по толщине образца. В практике тепловых испытаний воспроизведение

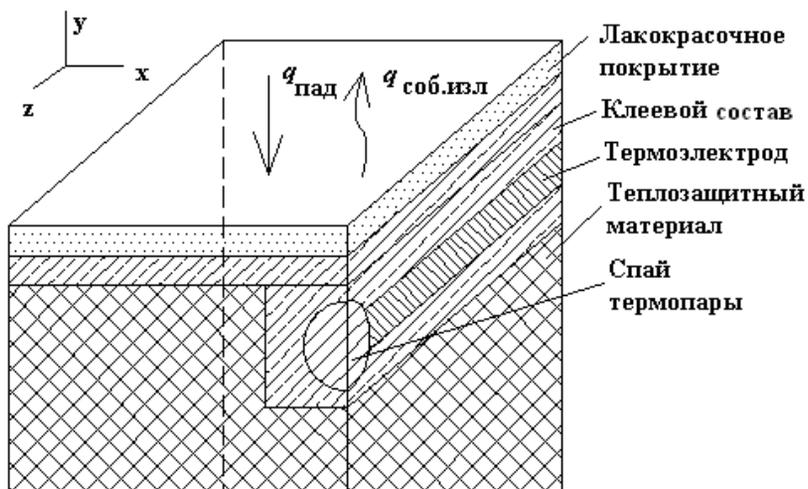


Рис. 1. Геометрическая модель объекта тепловых испытаний

динамического температурного поля на поверхности образца часто осуществляется по показаниям термопар, установленных на некоторой глубине вблизи нагреваемой поверхности, без учета методической погрешности, обусловленной существенной разницей температур на поверхности и в месте установки датчика.

Цель проведенной работы — разработка расчетной методики повышения точности определения температуры при тепловых испытаниях элементов конструкций летательных аппаратов и образцов композиционных материалов на стенде радиационного нагрева. Все результаты получены на основе теоретического исследования.

Использовалась трехмерная модель объекта тепловых испытаний (рис. 1), представляющая собой параллелепипед из теплозащитного материала марки ТТП-ФС с прямоугольным пазом $0,6 \cdot 10^{-3} \times 0,6 \cdot 10^{-3}$ м, длиной $3 \cdot 10^{-3}$ м. В него помещена хромель-алюмелевая термопара (диаметр термоэлектродов $0,2 \cdot 10^{-3}$ м, диаметр спая $0,5 \times 10^{-3}$ м), представляющая собой совокупность отдельных конструктивных элементов: термоэлектродов — цилиндрических стержней, имеющих идеальный контакт с шаром, моделирующим спай термопары. При расчете учитывается распространение теплоты вдоль термоэлектродов. В целях фиксации термопары паз заполняется клеем. Для придания одинаковой степени черноты ($\varepsilon = 0,9$) на всю нагреваемую поверхность наносят слой лакокрасочного покрытия. Теплофизические свойства материалов приведены в табл. 1 [5–7]. Если не указано иное, принимаем, что ось термопары совпадает с продольной осью симметрии паза. В процессе подготовки эксперимента расположение термопары в пазу может быть проконтролировано рентгеновским методом.

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплоемкость, Дж/кг·К	Плотность, кг/м ³
Лакокрасочное покрытие	0,29	1000,0	1400
Клеевой состав	0,20	1500,0	1200
Алюмель	32,70	942,0	8625
Хромель	16,00	451,0	8750
Теплозащитный материал	0,06	1423,2	370

На рис. 2, *а-в* приведена схема расположения контрольных точек: T_1 — температура на нагреваемой поверхности объекта испытаний далеко от места установки термопары, T_2 — температура в центре спая термопары, если продольная ось термопары совпадает с продольной осью симметрии паза, T_3 — температура в точке, расположенной далеко от места установки термопары на той же глубине, что и центр спая датчика, T_4 — температура на нагреваемой поверхности объекта испытаний в точке, расположенной на вертикальной оси, проходящей через

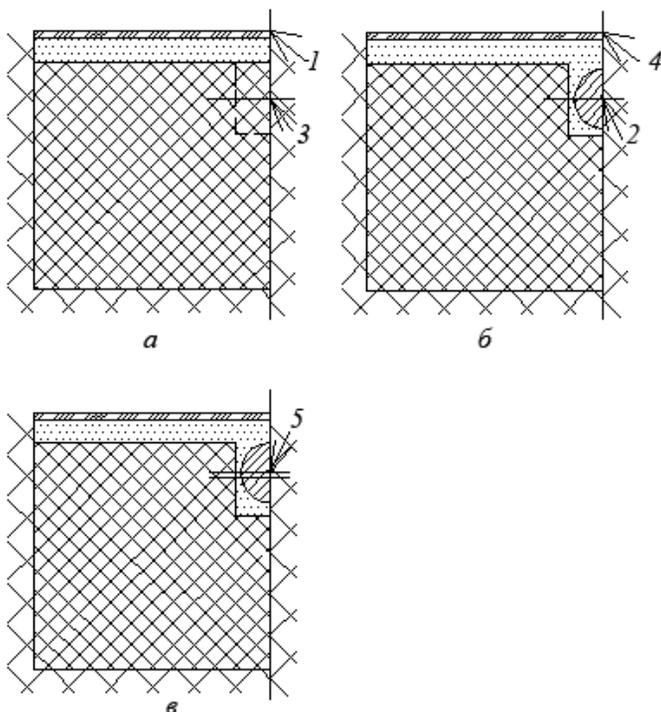


Рис. 2. Схема расположения контрольных точек:

а — объект испытаний; *б* — объект испытаний с термодатчиком, установленным в пазу (оси паза и термодатчика совпадают); *в* — объект испытаний с термодатчиком, ось которого смещена вверх относительно продольной оси паза

центр спая датчика (расстояние между парами точек 4 и 2, 1 и 3 по оси y составляет $0,3 \cdot 10^{-3}$ м), T_5 — температура в центре спая в случае, если продольная ось термопары смещена вверх относительно оси паза на расстояние $0,5 \cdot 10^{-4}$ м. Выбор места расположения контрольных точек связан с различными задачами исследования. Если, например, требуется определить истинную температуру в месте установки спая термопары, то целесообразно сравнить температуры в точках 3 и 2. Если в условиях эксперимента требуется контролировать температуру на поверхности образца по показаниям термопары, спай которой установлен на некоторой глубине от нее, то удобно сопоставлять температуры в точках 1 и 2 и т.д.

Трехмерная нестационарная задача теплопроводности решалась с помощью метода конечных элементов (МКЭ), реализованного в программном пакете Nastran. Для моделирования системы “образец-датчик” использованы КЭ в форме тетраэдров. Выбор КЭ такой формы обусловлен достаточной точностью моделирования с их помощью термоэлектродов и спая термопары и более высокой устойчивостью при расчете по сравнению с КЭ в виде параллелепипеда.

Образец нагревается постоянным по величине лучистым тепловым потоком, диапазон изменения плотности которого составляет от 50 до 250 кВт/м². В процессе нагрева происходит естественное охлаждение объекта испытаний в силу собственного излучения ($q_{\text{соб.изл}}$) нагреваемой поверхности. Формирование температурного состояния образца происходит под воздействием результирующего потока $q_{\text{рез}}$ (рис. 3), представляющего собой разность поглощенного и излученного потоков:

$$q_{\text{рез}}(T) = Aq_{\text{пад}} - \varepsilon\sigma T_1^4 = q_{\text{погл}} - q_{\text{соб.изл}}(T).$$

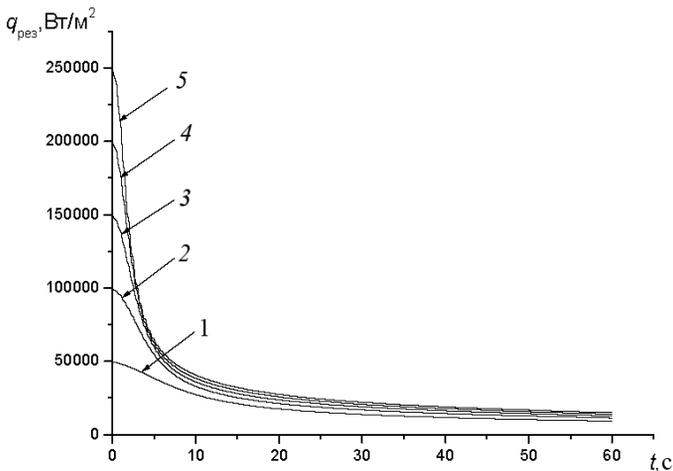


Рис. 3. Зависимость результирующего потока от времени для различных значений падающего теплового потока в точке 1

Видно, что наиболее заметное изменение $q_{\text{рез}}$ происходит в начальные моменты времени и сильно зависит от величины падающего потока.

Поскольку при испытаниях на стенде радиационного нагрева образец помещается в специальную теплоизолирующую подложку, то при моделировании на боковой и нижней поверхностях системы “образец–датчик” тепловые потоки принимаются равными нулю.

В исследовании использовалась геометрическая модель 1/4 части реального объекта испытаний. Возможность такого упрощения обусловлена симметрией образца и тем, что отличия свойств материалов двух термоэлектродов незначительно влияют на методическую погрешность. В табл. 2 приведены результаты расчета методической погрешности $\Delta T_{1,2} = T_1 - T_2$ в условиях нагрева системы “образец–датчик” тепловым потоком плотностью 50, 100 и 250 кВт/м², материалы термоэлектродов приняты одинаковыми (данные приведены для момента времени 60 с).

Таблица 2

T, К	q = 50 кВт/м ²		q = 100 кВт/м ²		q = 250 кВт/м ²	
	Хромель	Алюмель	Хромель	Алюмель	Хромель	Алюмель
T ₁	945,69	945,69	1147,95	1147,95	1464,89	1464,89
T ₂	890,63	889,39	1085,12	1084,14	1387,42	1386,46
$\Delta T_{1,2} = T_1 - T_2$	55,06	56,30	62,83	63,81	77,47	78,43

Поскольку для термоэлектродов из хромеля и алюмеля для одного значения плотности теплового потока величины $\Delta T_{1,2}$ отличаются менее чем на 0,15 %, то допустимо рассматривать термопару с термоэлектродами, имеющими при симметричном расчете одинаковые свойства. Таким образом, использование модели, представляющей собой 1/4 часть объекта испытаний является оправданным и позволяет существенно сократить время вычислений.

Нагрев тепловым потоком создает на поверхности объекта испытаний определенный температурный режим $T_1(t)$. Однако в практике тепловых испытаний для контроля динамического температурного поля поверхности используются показания термопарного датчика, заделанного на некоторую глубину в материал образца $T_2(t)$. Возникающая в этом случае методическая погрешность обусловлена двумя источниками: градиентом температур по глубине образца и наличием термопары внутри материала [8].

На рис. 4 приведен график зависимости от времени разности температур $\Delta T_{1,3}(t) = T_1 - T_3$, отражающей влияние на методическую

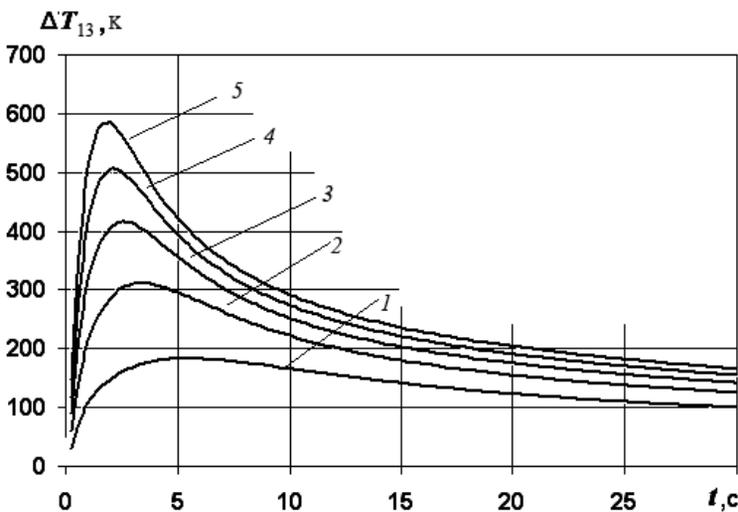


Рис. 4. Зависимость разницы температур $\Delta T_{1,3}$ от времени для исследуемых значений тепловых потоков:

1,2,3,4,5 — $q_{пад} = 50; 100; 150; 200; 250 \text{ кВт/м}^2$

погрешность градиента температуры по толщине образца из низкотеплопроводного материала.

Анализ зависимости $\Delta T_{1,3}(t)$ показал, что ее абсолютное значение растет с увеличением плотности теплового потока и достигает экстремальных значений в начальный период нагрева. Проведенное исследование позволило выявить корреляцию между рассматриваемой зависимостью $\Delta T_{1,3}(t)$ и зависимостью скорости изменения плотности результирующего теплового потока от времени $\frac{dq_{рез}}{dt}(t)$. Соответствие этих зависимостей друг другу выражается в совпадении моментов времени, в которых наблюдаются экстремальные значения рассматриваемых зависимостей. Можно сделать вывод о том, что в нестационарном режиме положение на графике $\frac{dq_{рез}}{dt}(t)$ экстремума функции определяет момент времени, в который зависимость $\Delta T_{1,3}(t)$ достигает своего максимального значения.

Для анализа влияния на методическую погрешность инородных тел (термопары и слоя клея) получена зависимость (рис. 5) $\Delta T_{3,2}(t) = T_3 - T_2$, представляющая собой разность температур в точке 3, удаленной от места заделки датчика, но находящейся на той же глубине, что и спай термопары, и в точке 2, расположенной непосредственно в его центре. Максимальные значения $\Delta T_{3,2}(t)$ сдвинуты во времени вправо относительно моментов времени, которым соответствуют экстремумы функций $\Delta T_{1,3}(t)$ и $\frac{dq_{рез}}{dt}(t)$. Смещение максимума значений абсолютной погрешности вызвано различием теплофизических свойств клеевого состава, термоэлектродов и основного материала-

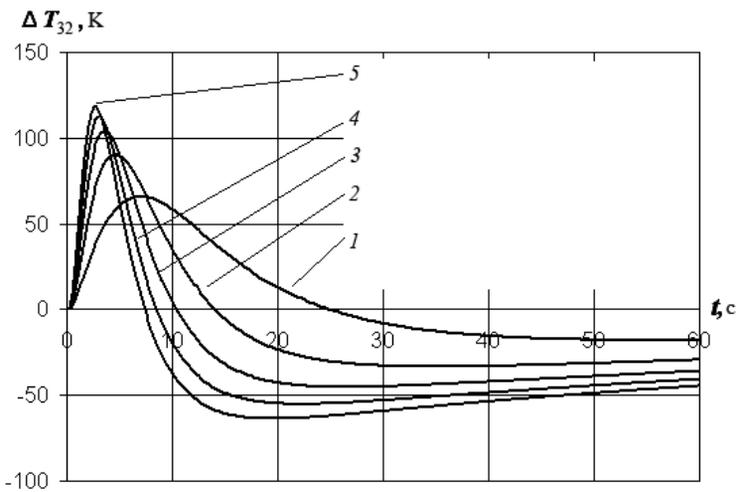


Рис. 5. Зависимость разницы температур $\Delta T_{3,2}(t) = T_3 - T_2$ от времени для исследуемых значений тепловых потоков:

1... 5 — см. рис. 4

ла. Поскольку для расчета величины разности $\Delta T_{3,2}(t)$ используются точки, расположенные на одинаковой глубине в образце, то смещение максимумов по временной шкале обусловлено только теплофизическими свойствами клея и материала термопары. Из рис. 5 виден факт смены знака $\Delta T_{3,2}(t)$, вызванный тем, что температура T_3 в определенный момент становится меньше температуры в центре спая термопары T_2 . Для основного материала величина объемной теплоемкости (произведение $C \cdot \rho$) ниже, чем для материала спая или термоэлектродов (см. табл. 1). В результате на участке (до 20 с) с большим темпом нагрева температура в точке 3 оказывается выше, чем температура в точке 2. А в дальнейшем, со снижением темпа нагрева влияние $C\rho$ на процесс передачи теплоты уменьшается и определяющим механизмом при прогреве конструкции становится теплопроводность, которая у металлического спая и термоэлектродов выше, чем у основного материала. Поэтому температура T_2 оказывается больше температуры T_3 и происходит смена знака зависимости $\Delta T_{3,2}(t)$ при приближении системы к регулярному режиму теплообмена.

На рис. 6 показана зависимость от времени температур поверхности в точках 1 и 4. Из рисунка видно, что температура в точке 1 на всем этапе нагрева оказывается заведомо выше, чем в точке 4. Это означает, что если при проведении эксперимента контроль уровня нагрева поверхности осуществляется только в точке, находящейся непосредственно над термопарой, существует опасность перегрева конструкции. Поэтому полезно вести дополнительный контроль температуры поверхности бесконтактными способами в точке 1, удаленной от места заделки датчика.

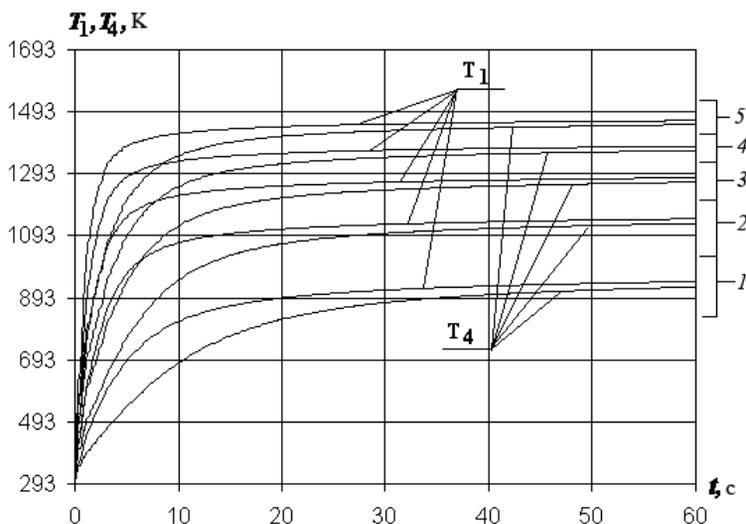


Рис. 6. Зависимость температур поверхности (точки 1 и 4) от времени для исследуемых значений падающего теплового потока:
 1... 5 – см. рис. 4

Зависимость от времени погрешности $\Delta T_{1,2}(t) = T_1 - T_2$, возникающей из-за наличия градиента температуры по глубине образца, имеющего инородные включения (термодатчик и слой клея), приведена на рис. 7.

Сближение кривых на рисунке на временном интервале, начиная с 20 с, означает, что процесс теплообмена переходит в область регулярного режима и величина погрешности сильнее зависит от геометри-

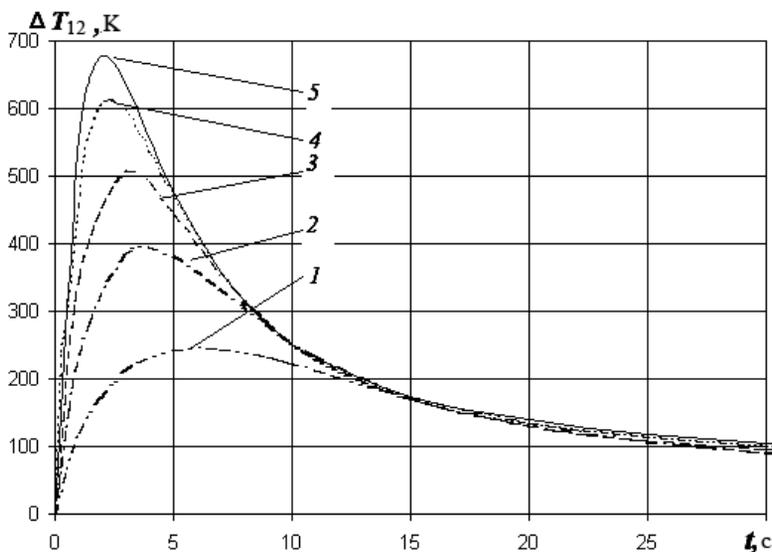


Рис. 7. Зависимость погрешности $\Delta T_{1,2}(t) = T_1 - T_2$ от времени для различных значений тепловых потоков:
 1... 5 – см. рис. 4

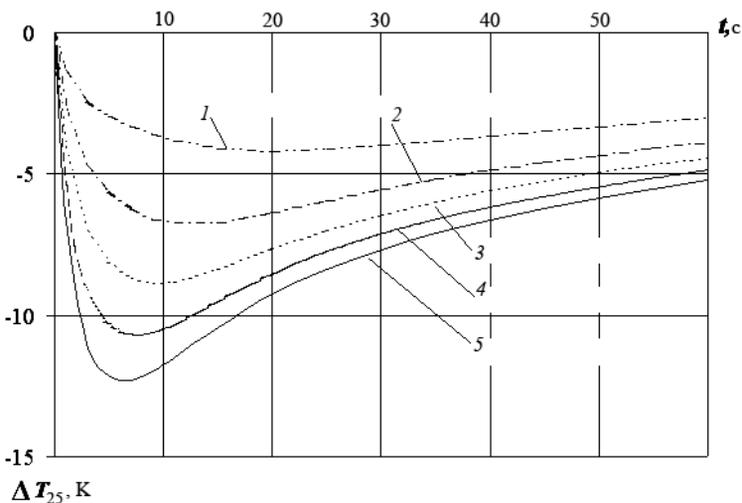


Рис. 8. Зависимость погрешности $\Delta T_{2,5}(t) = T_2 - T_5$ от времени (t_c – смещение оси термопары на $0,5 \cdot 10^{-4}$ м):

1... 5 – см. рис. 4

ческих и теплофизических характеристик системы “образец–датчик”, чем от плотности падающего теплового потока.

Воздействовать на методическую погрешность можно также, смещая термопары от продольной оси паза, например, ближе к поверхности (в рассматриваемом случае величина смещения равна $\Delta h_{\text{тп}} = 0,5 \times 10^{-4}$ м, которая для глубины паза $0,6 \cdot 10^{-3}$ мм составляет $\pm 8\%$). Погрешность, возникающая в этом случае, обусловлена градиентом температур по толщине образца и учитывает разницу температур в центре сая несмещенной и смещенной вверх термопары:

$$\Delta T_{1,5}(t) = T_1 - T_5 = \Delta T_{1,2} + \Delta T_{2,5}.$$

Зависимость $\Delta T_{2,5}(t) = T_2 - T_5$, представляющая собой поправку на неточность расположения датчика, показана на рис. 8. Смещение термопары вверх относительно продольной оси паза способствует уменьшению методической погрешности. Проведенное исследование показало, что для рассмотренных тепловых потоков вклад неточности установки термопары даже на начальном этапе нагрева составляет не более $\pm 5\%$ при неточности установки не более $\pm 8\%$.

Влияние теплофизических свойств клеевого состава на методическую погрешность отражено на графике зависимости $\Delta T_{1,2}(t)$ на рис. 9.

При исследовании влияния теплофизических свойств клеевого состава на методическую погрешность материал № 1 принят в качестве базового. Свойства материалов № 1, 2, 3 и 4 приведены в табл. 3.

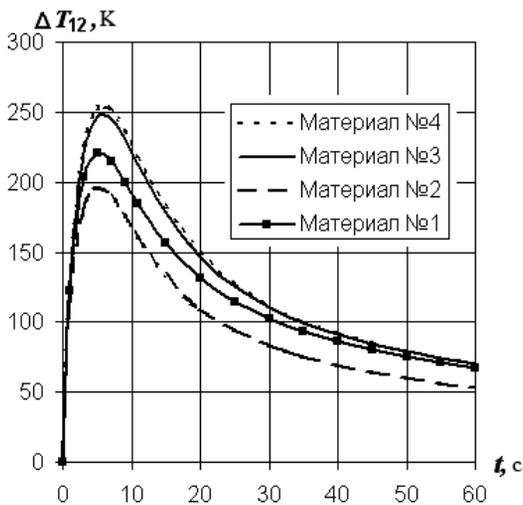


Рис. 9. Влияние теплофизических свойств клеевого состава на методическую погрешность $\Delta T_{1,2}(t)$

Таблица 3

Материал	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплоемкость, Дж/кг·К	Плотность, кг/м ³
1	0,06	1423,2	370
2	0,116	1423,2	370
3	0,06	2846,0	370
4	0,06	1423,2	740

Использование материалов с большей плотностью (№ 4) и большей теплоемкостью (№ 3), чем у базового, приводит к повышению погрешности. Применение материала № 2 с теплопроводностью в 2 раза большей, чем у базового, наоборот способствует снижению методической погрешности. В процессе исследования установлено, что влияние плотности и теплоемкости на методическую погрешность сказывается преимущественно в интервале до 20 с и составляет ~ 15 %. А воздействие теплопроводности клея на погрешность проявляется на всем рассмотренном промежутке и составляет ~ 11 %. В процессе исследования также было установлено, что на величину методической погрешности теплоемкость и плотность материала клеевого состава, заполняющего паз, оказывают более существенное влияние, чем теплопроводность этого вещества. Это означает, что при выборе клеевого состава предпочтение следует отдать материалу с более низким значением объемной теплоемкости.

Проведенные исследования показывают, что в рассмотренных условиях нагрева необходимо учитывать возникающие методические погрешности.

Для повышения точности измерения температуры и точности воспроизведения заданного температурного режима на поверхности при испытаниях на стенде радиационного нагрева элементов конструкций из низкотеплопроводных материалов необходимо:

— при проведении эксперимента получить зависимость температуры $T_2(t)$;

— рассчитать зависимости $\Delta T_{1,2}(t)$, учитывая возможное смещение термопары, свойства клеевого состава и $q_{\text{пад}}$;

— в системе регулирования использовать значения T_1 , скорректированные с учетом методической погрешности: $T_1(t) = T_2(t) + \Delta T_{1,2}(t)$.

Если цель проведения испытаний — определение теплофизических свойств материала, то необходимая для этого зависимость температуры в точке, координаты которой совпадают с координатами места установки спая термодатчика $T_3(t)$ (см. рис. 2, а), может быть получена расчетным путем с учетом величины методической погрешности $\Delta T_{3,2}(t)$:

$$T_3(t) = T_2(t) + \Delta T_{3,2}(t).$$

Выводы. 1. Выполнено расчетное исследование методической погрешности измерения температуры образцов низкотеплопроводных материалов термопарой, установленной в прямоугольный паз, с учетом реальной геометрии термоэлектродов и спая. Указанная постановка задачи позволила оценить и обосновать ряд упрощающих допущений, широко используемых в подобных расчетах. Исследование выполнено на основе решения трехмерной нестационарной задачи теплопроводности с нелинейными граничными условиями.

2. Получена количественная оценка погрешностей, обусловленных градиентом температуры по глубине образца, наличием термопары и слоя клея. Показано, что наибольшие значения погрешности ($\Delta T_{12}(t)$) имеют место на начальном этапе нагрева образца в первые десятки секунд и достигают значений 36...62% в зависимости от величины падающего потока излучения. Это обстоятельство может играть существенную роль в практике тепловых испытаний летательных аппаратов с малым временем работы в условиях нестационарного теплообмена с окружающей средой и при моделировании их температурного состояния.

3. Для рассмотренных условий при нагреве образца знак погрешности измерения температуры, обусловленной только влиянием инородного тела ($\Delta T_{32}(t)$), по прошествии некоторого времени изменяется на противоположный. Этот важный практический результат означает, что показания термопары в начальные моменты времени являются существенно заниженными по сравнению с истинной температурой в месте ее установки, а затем — наоборот. Определение истинной температуры по показаниям термопар без учета этого обстоятельства в первые

десятки секунд эксперимента может приводить к большому разбросу опытных данных, полученных в различные моменты времени в рассматриваемом временном интервале.

4. Результаты исследования позволяют задавать температуру на поверхности образца (T_1) по показаниям термопары, расположенной на некоторой глубине от нее (T_2), с учетом найденной методической погрешности $\Delta T_{12}(t)$, что дает возможность снизить вероятность перегрева конструкции еще на этапах подготовки и проведения эксперимента.

5. Исследовано влияние на методическую погрешность теплофизических свойств клеев, и дана рекомендация по выбору клея. Показано, что для уменьшения методической погрешности измерения температуры следует выбирать клеи с более низким значением объемной теплоемкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Елисеев В. Н., Воротников В. И., Товстоног В. А., Соловов В. А. Оценка погрешности измерения поверхностной температуры полупрозрачного материала контактным датчиком // Известия вузов. Сер. "Машиностроение". – 1981. – №11. – С. 77–81.
2. Ярышев Н. А. Теоретические основы измерения нестационарной температуры. – Л.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Reznik S. V., Prosuntsov P. V., Mikhalev A. M. and Kalinin D. Yu. Identification of Radiative and Conductive Heat Transfer Parameters at Presence of Errors in Initial Data // Inverse Problems and Experimental Design in Thermal and Mechanical Engineering. Proc. Eurotherm Seminar 68, 2001. – P. 293–300.
4. Баранов А. Н., Давыдова В. В., Попова Т. А. и др. Методические погрешности измерения термопарами температуры тонкостенной металлической конструкции // Тр. ЦАГИ. – 2002. – Вып. 2658.
5. Температурные измерения: Справочник / Геращенко О.А., Гордов А.Н., Лах В.И. и др. – Киев: Наукова думка, 1984. – 495 с.
6. Таблицы физических величин: Справочник / Под ред. И.К. Кикоина. – М: Атомиздат. 1976. – 1005 с.
7. Справочник по электротехническим материалам / Под ред. Корицкого Ю.В. – М: Энергоатомиздат, 1987. 2 т. – 464 с.
8. Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита. – М.: Энергия, 1976.
9. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача: Учебник. М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

Статья поступила в редакцию 13.06.2006

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 Launch Vehicles” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of heat transfer in spacecraft constructions.

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.



Yeliseev V.N. (b. 1931) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1954. D.Sc.(Eng), professor of the “Spacecraft and Launch Vehicles” Department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of heat transfer in spacecraft constructions.

Игорь Иванович Лопухов родился в 1941 г. В 1963 г. окончил Казанский авиационный институт. Канд. техн. наук, зам. начальника отдела НПО машиностроения. Автор более 20 научных работ в области теплофизики.

I.I. Lopukhov (b. 1941) graduated from the Kazan Aviation Institute in 1963. Ph. D. (Eng.), deputy chief of department of the scientific and production association “NPO Mashinostroyeniya”. Author of more than 20 publications in the field of thermal physics.

В издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышла из печати книга

Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели / Учебник для вузов (в пер.), 2005 г., 488 с.

Изложены основы проектирования жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Даются основные положения теории, методы расчета и описание узлов и агрегатов двигательных установок с ЖРД. Рассмотрены процессы расширения газов в соплах, смесеобразования и теплообмена, а также методы профилирования сопел, расчета форсунок, определения форм и объема камеры сгорания. Приведены системы подачи с турбонасосными агрегатами и вытеснительные системы подачи с газовым, пороховым и жидкостным аккумуляторами давления. Изложены методики и примеры расчетов элементов конструкции и ЖРД в целом.