

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКОВ НА АНИЗОТРОПНЫХ ТЕРМОЭЛЕМЕНТАХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГЕТЕРОГЕННЫХ СТРУКТУРАХ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ НА УДАРНЫХ ТРУБАХ

**П.А. Попов¹, С.А. Поняев¹, Н.А. Монахов¹, Р.О. Куракин¹, Т.А. Лапушкина¹,
В.А. Сахаров¹, А.В. Павлов², М.А. Котов³**

¹*ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург*

²*Санкт-Петербургский Политехнический Университет Петра Великого, Санкт-Петербург*

³*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*
pavel.popov@mail.ioffe.ru

Аннотация. Представлены результаты анализа применимости термоэлектрических датчиков на анизотропных термоэлементах, металлических гетерогенных структурах для измерения теплового потока в газодинамических экспериментах. Разработана методика обработки сигнала и проведена оценка погрешности измерений. Методика калибровки в импульсном тепловом режиме позволяет определить вольт-ваттный коэффициент датчика и установить отсутствие дефектов кристаллической структуры чувствительного элемента. Сравнение результатов измерений с известными теоретическими зависимостями и данными численного моделирования обтекания тел простых форм показало достоверность разработанной технологии тепловой диагностики в эксперименте на ударных трубах.

Несмотря на значительные достижения в численном моделировании, экспериментальные исследования остаются основным источником наиболее достоверных данных о аэротермодинамике высокоскоростных летательных аппаратов. Измерение тепловых потоков к поверхности тела, является базовой диагностикой, позволяющей получить интегральную характеристику процессов тепло- и массообмена в ударном слое. Наибольший интерес представляют режимы с высокой энтальпией, когда проявляются свойства реального газа и начинают протекать реакции диссоциации и ионизации в ударном слое [1]. В условиях наземного эксперимента, достаточно полное воспроизведение условий высокоскоростного полета возможно лишь на установках импульсного действия, что накладывает ограничения на возможные методы измерений тепловых потоков. Применяемые датчики должны обладать высоким быстродействием $< 1 \mu s$, широким динамическим диапазоном от 100 kW/m^2 до $\sim 10 \text{ MW/m}^2$ и высокой механической прочностью. Сложный химический состав газа и увеличение доли лучистого теплового потока значительно усложняют технологию тепловой диагностики. По этим причинам, важным направлением в современном газодинамическом эксперименте является разработка новых высокоточных и надежных методов измерения тепловых потоков, поскольку имеющиеся диагностические средства становятся неприменимы.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе совместно с Санкт-Петербургским политехническим университетом разрабатываются и внедряются новые подходы в тепловой диагностике в экспериментах на ударных трубах. Для измерения конвективных тепловых потоков используются термоэлектрические датчики на основе анизотропных термоэлементов из висмута и гетерогенных металлических макроструктур из меди и никеля толщиной $\approx 0.5 \text{ mm}$ [2]. Измерение лучистых тепловых потоков проводится с помощью датчиков на основе микроструктур из хрома и теллурида германия толщиной $\approx 1 \mu m$ [3]. Их принцип действия основан на генерации термоэлектрического поля в чувствительном элементе, обладающем анизотропией термоЭДС при появлении в нем градиента температуры [4]. Проведен детальный анализ тепловых и термоэлектрических процессов в анизотропных термоэлементах и гетерогенной макроструктуре при условиях, типичных для измерений на ударных трубах. Разработана и апробирована методика расчета теплового потока по сигналу датчиков [5], проведена оценка погрешности измерений для датчиков различных размеров. Исследования показали, что тонкопленочные гетерогенные датчики могут быть использованы в качестве эталонных при импульсных измерениях, поскольку тепловой поток рассчитывается непосредственно по их электрическому сигналу [3].

Разработана технология калибровки всех используемых датчиков. Перед установкой на исследуемые модели, датчики последовательно калибруются в стационарном [2] и импульсном тепловом режиме [6]. Сначала они устанавливаются на специальный стенд, где через них проходит фиксированный тепловой поток и регистрируется электрический сигнал, по которому определяется индивидуальный вольт-ваттный коэффициент. Далее, они устанавливаются в торце ударной трубы и регистрируются сигналы датчиков, нагреваемых газом за отраженной ударной волной. По начальным условиям эксперимента рассчитываются параметры газа за отраженной ударной волной и теоретический тепловой поток. Далее, подбирается вольт-ваттный коэффициент, когда различие между теоретическим значением и рассчитанным по сигналу датчика минимально. Помимо этого, калибровка в импульсном режиме позволяет определить наличие дефектов кристаллической структуры анизотропных термоэлементов, поскольку эти дефекты существенно влияют на форму и амплитуду сигнала датчика. Применение аргона в качестве рабочего газа позволяет проводить калибровку в широком диапазоне температур и тепловых потоков поскольку используемые типы датчиков обладают существенно различными

вольт-ваттными коэффициентами. Опыт применения датчиков на анизотропных термоэлементах показал, что даже в случае одинакового размера чувствительного элемента, вольт-ваттный коэффициент может заметно отличаться, что обусловлено особенностями технологии их изготовления. Для датчиков на металлических гетероструктурах этот коэффициент практически совпадает и не изменяется со временем даже при повреждении рабочей поверхности в ходе экспериментов.

Накопленный опыт показывает, что датчики на анизотропных термоэлементах обладают наибольшей чувствительностью и позволяют проводить измерения малых тепловых потоков ~ 100 кВт/м², но весьма хрупкие и должны устанавливаться на боковых поверхностях моделей. Наибольшей механической прочностью обладают датчики на металлических гетероструктурах, они позволяют проводить измерения вблизи критической точки при температурах торможения до 5000 К даже в условиях потока газа, содержащего твердые частицы. В силу низкого вольт-ваттного коэффициента был разработан малогабаритный усилитель что позволяет устанавливать его внутри исследуемых моделей.

С помощью датчиков на анизотропных термоэлементах из висмута и датчиков на основе металлических гетерогенных структур проведены измерения на поверхности конических моделей и затупленных тел. Сравнение полученных результатов с известными теоретическими зависимостями и результатами численного моделирования показало применимость датчиков и достоверность методики обработки сигнала и их калибровки. С помощью датчиков на основе микроструктур из хрома и теллурида германия толщиной ≈ 1 мкм выполнены измерения лучистого теплового потока при отражении сильных ударных волн в ксеноне. Полученные результаты позволяют утверждать, что представленные датчики с взаимодополняющими характеристиками позволяет проводить измерения в любых точках моделей в широком диапазоне плотностей теплового потока от 100 кВт/м² до 10 МВт/м² и различными характерными временами процессов теплообмена от 1 мкс до 1 мс.

Литература

1. B. R. Hollis, D. K. Prabhu, M. Maclean, A. Dufrene // Blunt-Body Aerothermodynamic Database from High-Enthalpy Carbon-Dioxide Testing in an Expansion Tunnel, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 31:3 2017. pp. 712–731
2. S. Z. Sapozhnikov, V. Yu. Mityakov, A. V. Mityakov // Heatmetry: The Science and Practice of Heat Flux Measurement. 2020. pp. 209
3. M. A. Kotov, A. N. Shemyakin, N. G. Solovyov, M. Yu. Yakimov, V. N. Glebov, G. A. Dubrova, A. M. Malyutin, P. A. Popov, S. A. Poniaev, T. A. Lapushkina, N. A. Monakhov, V. A. Sakharov // Performance assessment of thermoelectric detector for heat flux measurement behind a reflected shock of low intensity, Applied Thermal Engineering, 195 2021. pp. 117143
4. D. M. Rowe // Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano. 2006. pp. 954
5. П. А. Попов, С. В. Бобашев, Б. И. Резников, В. А. Сахаров // Метод расчета нестационарного теплового потока по сигналу датчика на основе анизотропных термоэлементов из монокристалла висмута, Письма в ЖТФ, 44:8 2018. 3–10
6. П. А. Попов, Н. А. Монахов, Т. А. Лапушкина, С. А. Поняев, Р. О. Куракин // Калибровка тепловых датчиков на анизотропных термоэлементах и гетерогенных металлических структурах с помощью отраженной ударной волны, Письма в ЖТФ, 48:20, 2022. 7–10