

УЧЕТ ИНЕРЦИОННОСТИ ДАТЧИКОВ ТЕМПЕРАТУРЫ В БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИХ ПРОЦЕССАХ

М.А. Гольдфельд, В.В. Пикалов

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия*

Термопары являются одним из наиболее широко используемых приборов для измерения температуры из-за их простоты изготовления, надежности и широкого диапазона работы [1, 2]. Однако из-за относительно медленного времени отклика термопары подходят в приложениях, где температура изменяется относительно медленно (менее 10 Гц). Для более скоростных температурных изменений используются оптические системы измерения с быстрым откликом. Однако такие системы трудно использовать в сложных условиях (например, в камерах сгорания), они не всегда надежны и не применимы для многих приложений. Методы коррекции сигналов необходимы во многих приложениях для восстановления истинной температуры по экспериментальным измерениям. Одной из областей, где трудно применять оптические методы, является импульсная труба с высокой энтальпией, особенно при испытаниях ГПВРД. В настоящей работе измерение температуры потока от 1500К до 3000К осуществляется при числах Маха от 5 до 8. В этих условиях время работы составляет 100-150 мс, а время измерения не превышает 20-40 мс.

Из-за инерции термопар измеренная температура должна зависеть не только от текущей температуры потока, но и от предыдущих температур. Эти причины стали основой для использования особого подхода к интерпретации измеренного сигнала, а именно, применения интегрального уравнения свертки для его математического описания [3, 4]. Проблемы получения и учета аппаратной функции прибора обычно сводятся к решению интегральных уравнений типа свертки [5]. Обработка сигналов и решение этих уравнений называется проблемой деконволюции. Для нахождения аппаратной функции обычно необходимо подать на детектор импульсное тепловое воздействие, описываемое математической дельта-функцией. Однако очень часто создание такого импульса практически невозможно, поэтому более простой подход заключается в использовании ступенчатой тепловой нагрузки на детектор, тогда первая производная измеренного сигнала и даст экспериментально полученную аппаратную функцию прибора (отклик прибора на входную дельта-функцию). Ранее авторы использовали для реализации ступенчатой тепловой нагрузки на термопару ее погружение в расплав алюминия, что дало первый способ оценки аппаратной функции [6, 7]. В данной работе авторы получили независимый способ такой оценки уже непосредственно в сверхзвуковом газовом потоке, когда удалось достичь режима постоянной температуры. Представлены результаты измерения калибровочных сигналов, полученных с их помощью новых оценок аппаратных функций термопар, а также реконструкция оценок истинных динамических распределений температур. В обработке сигналов использованы сглаживающие сплайны, медианная фильтрация и итерационный алгоритм деконволюции с регуляризацией.

Работа частично выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610126-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cambray P.** Measuring thermocouple time constants: A new method. // *Combust. Sci. Technol.* 1986. Vol. 45, No.4. P.221–224.
2. **Loehle S., Battaglia J.-L., Batsale J.-C., Enouf O., Dubard J., Filtz R.-R.** Characterization of a heat flux sensor using short pulse laser calibration. // *Review of Scientific Instruments.* 2007. Vol. 78, No.5, art. 053501.
3. **Алифанов О.М.** Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988.
4. **Мее Д.Д.** Dynamic calibration of force balances for impulse hypersonic facilities. // *Shock Waves.* 2003. Vol. 12. P.443-455.
5. **Riad S.** The deconvolution problem: An overview. // *Proceedings of the IEEE.* 1986. Vol. 74, No.1, P. 82–85, 1986.
6. **Pickalov V.V.** Flow diagnostics and inverse problems: deconvolution and tomography. 15th International Conference on Methods of Aerophysical Research (ICMAR-2010, Novosibirsk, November 1-5, 2010). Abstracts. Pt. II. Novosibirsk, Parallel, 2010. P. 200-201.
7. **Goldfeld M.A., Pickalov V.V.** Application of method of deconvolution at temperature measurements in high-enthalpy impulse wind tunnels // *Applied Thermal Engineering.* 2017. Vol. 113. P. 731-738.