

нения при удалении от резонансного максимума в сторону высоких частот, которая указывает, что выражение (1) недостаточно точно описывает вклад в акустический сигнал от соседних резонансных максимумов. Отклонение в непосредственной близости от максимума может быть обусловлено реальным отличием формы частотной зависимости от формулы Лоренца.

Заключение. Показано, что отличие теоретически рассчитанных частотных зависимостей акустического сигнала от зависимостей, полученных лоренцевой функции (1), соответствует сдвигу температуры до 1 мК. Данный температурный сдвиг обусловлен как вкладом от соседних максимумов, так и отличием формы самого максимума от рассчитанного в выражении (1). Выявлено, что экспериментальные частотные зависимости акустического сигнала, полученные на сферическом акустическом резонаторе ВНИИФТРИ, описываются выражением (1). При этом значение температуры, определенное для моды (0,3) из аппроксимации экспериментальных частотных зависимостей, отличается от температуры, измеренной родий-железным термометром сопротивления, менее чем на 3 мК.

Л и т е р а т у р а

1. Moldover M. R., Gavioso R. M., Mehl J. B., Pitre L., M. de Podesta, Zhang J. T. Acoustic gas thermometry // Metrologia. 2014. V. 51. P. R1—R19.
2. Benedetto G., Gavioso R. M., Spagnolo R., Marcarino P., Merlone A. Acoustic measurements of the thermodynamic temperature between the triple point of mercury and 380K // Metrologia. 2004. V. 41. P. 74—98.

3. Pitre L., Moldover M. R., Tew W. L. Acoustic thermometry: new results from 273K to 77K and progress towards 4K // Metrologia. 2006. V. 43. P. 142—162.

4. Moldover M. R., Trusler J. P. M., Edwards T. J., Mehl J. B., Davis R. S. Measurement of universal gas constant R using a spherical acoustic resonator // J. Res. Natl. Bur. Stand. 1988. V. 2. P. 85—144.

5. Pitre L., Sparasci F., Truong D., Guillou A., Risegari L., Himbert M. E. Measurement of the Boltzmann constant k_B using a quasi-spherical acoustic resonator // Int. J. Thermophys. 2011. V. 32. P. 1825—1886.

6. Morse P. M., Ingard K. U. Theoretical Acoustics / McGraw-Hill, N. Y. 1968.

7. Кытин В. Г. Моделирование акустического резонанса в сферических резонаторах для прецизионного определения термодинамической температуры // Измерительная техника. 2015. № 1. С. 35—39.

8. Mehl J. B., Physique C. R. Ab initio properties of gaseous helium // C. R. Physique. 2009. V. 10. P. 859—865.

9. Mehl J. B., Moldover M. R. Measurement of the ratio of the speed of sound to the speed of light // Phys. Rev. A. 1986. V. 34. P. 3341—3344.

10. May E. F., Pitre L., Mehl J. B., Moldover M. R., Schmidt J. W. Quasi-spherical cavity resonators for metrology based on the relative dielectric permittivity of gases // Rev. Sci. Instrum. 2004. V. 75. P. 3307—3317.

Дата принятия 23.10.2015 г.

621.317.794

Измерения тепловых потоков высокой плотности с помощью автоматизированной установки

А. В. ШАРКОВ¹, В. А. КОРАБЛЕВ¹, Д. С. МАКАРОВ¹, Д. А. МИНКИН^{1, 2},
А. С. НЕКРАСОВ^{1, 2}, А. А. ГОРДЕЙЧИК¹

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики, С.-Петербург, Россия, e-mail: sharkov@grv.ifmo.ru

² Санкт-Петербургский университет государственной противопожарной службы Министерства РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, С.-Петербург, Россия, e-mail: post@nekrasov.as

Рассмотрены проблемы измерений высокоинтенсивных тепловых потоков, возникающих при моделировании пожаров. Проанализированы методы и средства измерений потоков в пожарных лабораториях, выявлены недостатки существующих решений. Предложена схема устройства и метод его калибровки.

Ключевые слова: радиометр, датчик теплового потока, тепловой поток, калибровка.

The problems of measurement of high density heat fluxes in fire modeling are considered. The existing methods and devices for heat flux measurement in fire laboratories are analyzed. The disadvantages of existing solutions are described. The device and method of its calibration are suggested.

Key words: radiometer, heat flux sensor, heat flux, calibration.

Несмотря на развитие техники и технологий в области пожарной безопасности, невозможно избежать крупных природных и техногенных пожаров. Задачи исследования процессов их возникновения и развития в условиях высоких

давлений и температур достаточно актуальны. Тепловое излучение является одним из поражающих факторов пожара. Доля энергии, приходящаяся на лучистую составляющую, при пожаре может достигать 90 %, поэтому высокоинтенсивное

излучение — важная характеристика, требующая не только точного измерения, но и изучения характера изменения параметров во времени при различных внешних условиях [1]. Моделирование и исследование формирования пожаров в малых замкнутых технологических помещениях требует проведения измерений в десятках точек с обязательным контролем этих параметров.

Изучение тепловых потоков высокой интенсивности многие пожарные лаборатории, исследовательские центры и институты, такие как LNE (Франция), SP (Швеция), TNO (Голландия) и VTT (Финляндия), проводят с помощью устройств прямых измерений. Для определения огнестойкости различных материалов, изучения характера воспламенения и развития горения, исследований в области надежности и долговечности экипировки и оборудования пожарных широко применяют радиометры, работающие по схеме Гардона [2]. К преимуществам конструкции таких датчиков можно отнести устойчивость к высоким температурам и тепловым потокам. Чувствительным элементом (ЧЭ) в них является круглый диск из константана. В центре диска, а также на его периферии, охлаждаемой жидкостью, закреплены медные провода. Тепловой поток, падая на зачерненный ЧЭ, создает перепад температур между его центром и периферией, который пропорционален разности потенциалов на медных проводах. Недостатком конструкции является использование жидкостного охлаждения ЧЭ, так как испытания могут проходить в условиях, когда температура теплоносителя изменяется в подводящих к устройству трубках, что увеличивает погрешности измерений, или при давлениях внешней среды, при которых использование гибких шлангов невозможно. При проведении экспериментов с множеством датчиков многократно усложняется коммутация всех линий.

Схема охлаждения периферии диска представлена на рисунке. В качестве ЧЭ использована никелевая фольга 2 толщиной 0,15 мм и диаметром 15 мм. Проводниками с положительным потенциалом относительно никеля служит константановая проволока 6 диаметром 0,2 мм. Чувствительный элемент зафиксирован на теплоемком стальном ядре 4 винтами 1. Ядро на основании 8 закреплено винтами 5 и гайками 7, снаружи изолировано минеральной ватой 9. Корпус 3 изготовлен из полированной нержавеющей стали для уменьшения поглощения излучения. Использование конструкции с теплоемким теплоизолированным ядром позволило обходиться без жидкостного охлаждения периферии ЧЭ. Также возможно проведение экспериментов в условиях высоких температур, так как полированный нержавеющей корпус и теплоизолятор из минеральной ваты замедляют нагрев ядра с боковых поверхностей, в результате этого обеспечивается работа ЧЭ в среде с температурой до 500 °С в течение 15 мин. Параметры ЧЭ рассчитывали по зависимостям, определенным в [3], исходя из максимального теплового потока 50 кВт/м² и требуемого времени выхода на стационарный тепловой режим менее 2 с.

В современной отечественной нормативной документации не регламентирована поверка датчиков теплового потока свыше 10 кВт/м² [4], а в реестре государственных первичных эталонов России отсутствуют эталоны единицы плотности радиационного теплового потока свыше 5000 Вт/м². Однако ряд международных стандартов [5, 6] требует проведе-

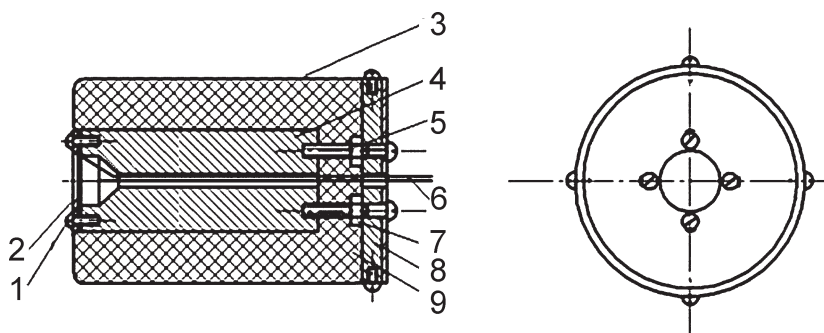


Схема устройства с теплоемким теплоизолированным ядром:

1, 5 — винты; 2 — никелевая фольга; 3 — корпус; 4 — теплоемкое стальное ядро; 6 — константановая проволока; 7 — гайки; 8 — основание; 9 — минеральная вата

ния испытаний защитных костюмов при тепловых потоках плотностью 50 кВт/м². Например, в лаборатории NIST имеется эталон, способный обеспечить тепловой поток интенсивностью от 10 кВт/м² [7], который позволяет калибровать датчики теплового потока согласно стандартам [8—10].

Радиометры откалиброваны с помощью малоинерционной трубчатой печи с терморегулятором МТП-2МР, имеющей диаметр рабочей полости 50 мм. Для определения теплового потока собрана установка, состоящая из трубчатой печи МТП-2М, регулятора БУ-7-4, милливольтметра В2-99, соединительного кабеля. Цилиндр из меди диаметром 15 мм, среднеобъемная температура которого контролируется термопарой, установлен на тонких шипах соосно рабочей полости печи. Облучаемое основание цилиндра зачернено и помещено в одной плоскости с тонким полированным металлическим экраном на расстоянии 20 мм от рабочей полости печи. Экран исключает облучение боковой поверхности цилиндра, а зазор между рабочей полостью печи и плоскостью экрана предотвращает его нагрев конвективными потоками.

Цилиндр нагревали в печи при температурах 200—1000 °С с шагом 200 К. Температуру печи контролировали регулятором БУ-7-4 с нестабильностью поддержания температурного режима 0,1 К/мин и абсолютной основной погрешностью ±3 К. После выхода печи на стационарный режим цилиндр устанавливали на шипы и измеряли его температуру. Напряжение на концах хромель-алюмелевой термопары определяли милливольтметром В2-99 с абсолютной погрешностью ±0,002 мВ каждые 15 с в течение 20 мин. Аналогично был исследован процесс остывания цилиндра в спокойной воздушной среде. Все показания автоматически заносились в таблицу с помощью подключенного к милливольтметру персонального компьютера.

Цилиндр остывает согласно закону

$$\vartheta(\tau) = \vartheta_0 e^{-\sigma\tau/C}, \quad (1)$$

где ϑ_0 , $\vartheta(\tau)$ — начальное и текущие значения перегрева цилиндра относительно окружающей среды, соответственно; σ — лучисто-конвективная проводимость в среду; C — теплоемкость цилиндра; τ — время [11].

Из аппроксимации данных эксперимента охлаждения экспоненциальной функцией (1) следует равенство $\sigma/C=0,003 \text{ с}^{-1}$, что совпадает с теоретическим значением. Проводимость в

среду σ определяется умножением отношения σ/C на рассчитанную теплоемкость цилиндра.

Нагрев цилиндра описывается зависимостью

$$\vartheta(\tau) = qA/\sigma (1 - e^{-\sigma\tau/C}), \quad (2)$$

где q — плотность теплового потока; A — площадь поверхности, на которую падает тепловой поток [11].

Аппроксимация данных эксперимента нагревания цилиндра функцией (2) позволяет определить параметры q , A , σ . В результате опыта получена эмпирическая зависимость $q = f(T)$, где T — температура встроенного в печь датчика.

Радиометр необходимо калибровать, расположив датчик таким образом, чтобы ЧЭ находился так же, как облучаемое основание медного цилиндра при калибровке. Следовательно, тепловой поток, попадающий на основание медного цилиндра, будет равен потоку, падающему на ЧЭ датчика. Так как калибровочная характеристика датчика является линейной [3], калибровку проводят по двум точкам, например 400 и 1000 °С, что соответствует 2650 и 29650 Вт/м². На основании данных с радиометра в программное обеспечение устройства автоматического измерения вносятся корректирующие коэффициенты.

Для автоматизации измерений выбран инструментальный усилитель INA333 и отладочная плата STM32F4DISCOVERY в качестве контроллера. Усилитель подобран, исходя из высоких требований к дрейфу напряжения по входу усилителя (0,1 мкВ/К) и соотношению сигнал—шум. Для обеспечения низкой (до 1 %) погрешности усилитель должен иметь высокое входное сопротивление (100 ГОм), низкое напряжение смещения (25 мкВ) в широком диапазоне температур (–40...+125 °С), высокие точность передачи сигнала и степень подавления синфазных помех (коэффициент подавления 100 дБ). Производитель заявляет относительную общую погрешность в пределах 0,25 % при коэффициенте усиления 1000 в нормальных условиях и максимальную — вплоть до 0,5 %.

При выборе контроллера приоритетные параметры следующие: высокая разрядность встроенного аналого-цифрового преобразователя и удобство при работе, создаваемое программным обеспечением и специальными библиотеками. Отладочная плата соответствует заявленным требованиям. Существуют библиотеки, в том числе предоставленные производителем, которые позволяют упростить разработку программного обеспечения для данного контроллера. Встроенный преобразователь микроконтроллера STM32F4 имеет три 12-битных аналого-цифровых преобразователя, что при среднем уровне сигнала (с учетом исключения ошибочных) имеет погрешность порядка 0,2 % при опорном на-

пряжении 3 В. Выбранные компоненты позволяют при необходимости увеличивать число каналов измерения в соответствии с требуемым количеством датчиков.

Разработанная установка включена в состав стенда для сертификации противопожарного снаряжения и оборудования и используется для исследований процессов развития пожара в замкнутых объемах при различной нагрузке, газовом составе и давлениях среды.

Л и т е р а т у р а

1. Сухинин А. И., Конев Э. В. Вопросы лесной пирологии. Красноярск, 1972.
2. Filtz J.-R., Lievre M., Valin T., Hameury J., Wetterlund I., Persson B., Andersson P., Jansson R., Lemaire T., Öhlin M., Myllymäki J. Improving heat fluxmeter calibration for fire testing laboratories (HFCAL) // Final report, Bruxelles Belgique, 2002.
3. Шарков А. В., Кораблев В. А., Некрасов А. С., Фадеева С. В., Минкин Д. А. Радиометр для измерения плотности высокоинтенсивных тепловых потоков и метод его калибровки // Измерительная техника. 2011. № 11. С. 43—45.
4. ГОСТ Р 8.797—2012. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений поверхностной плотности теплового потока в диапазоне от 1 до 10000 Вт/м².
5. ГОСТ Р ИСО 6942—2007. Система стандартов безопасности труда. Одежда для защиты от тепла и огня. Методы оценки материалов и пакетов материалов, подвергаемых воздействию источника теплового излучения.
6. ГОСТ Р ИСО 9151—2007. Система стандартов безопасности труда. Одежда для защиты от тепла и огня. Метод определения теплопередачи при воздействии пламени.
7. Курбатова Н. А., Черепанов В. Я. Экспериментальные исследования установки для поверки датчиков теплового потока радиационно-конвективным методом // Интерэкспо Гео-Сибирь—2012. № 4. Т. 2. С. 177—181.
8. ISO 14934-1:2010. Определение температуры воспламенения. Поверка и использование измерителей (удельного) теплового потока. Ч. 1. Общие принципы.
9. ISO 14934-2:2013. Испытания на огнестойкость. Калибровка и применение тепломеров. Ч. 2. Методы первичной калибровки.
10. ISO 14934-3:2012. Испытания на огнестойкость. Калибровка и применение тепломеров. Ч. 3. Метод вторичной калибровки.
11. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.

Дата принятия 23.10.2015 г.