

## Применение термографии для исследования оптических свойств плазменных струй\*

Е.Л. Лобода<sup>1,2</sup>, М.В. Агафонцев<sup>1,2</sup>, А.А. Старосельцева<sup>1</sup>, В.Н. Фатеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия

Представлены результаты экспериментальных исследований оптических свойств плазменных струй с применением методов термографии. В качестве рабочего тела применялись следующие газы: воздух, азот, углекислый газ, аргон. Показано, что выбор узкого спектрального интервала в средневолновом ИК-диапазоне дает возможность практически исключить влияние излучения плазменной струи на результаты измерений температуры поверхности образца, подвергающегося термическому разрушению плазменной струей, что позволяет получать поле температуры поверхности образца с хорошим пространственным разрешением и исключить проблему разрушения чувствительного элемента при использовании контактных методов измерений. Представлен оригинальный способ калибровки ИК-камеры «научного класса» по излучению CO<sub>2</sub> для определения термодинамических температур в плазменной струе с рабочим телом CO<sub>2</sub>.

**Ключевые слова:** ИК-термография, плазма, спектр, температура.

### Введение

Применение методов ИК-термографии для определения полей температуры, качественного анализа теплового контраста и отклика материала на воздействие теплового излучения, в том числе для поиска скрытых дефектов и неоднородностей, широко распространено в науке и практике [1–4]. В случаях, когда объект исследования представляет собой твердую или жидкую среду, применение ИК-камер и методов ИК-термографии не представляет особых сложностей и определение коэффициента излучения среды позволяет получить результаты с достаточно высокой точностью. В случае, когда среда представляет собой излучающую смесь газов, в которой протекают химические реакции, что характерно для процессов горения, применение методов ИК-термографии сопряжено с рядом фундаментальных трудностей [5], которые накладывают повышенные требования к применяемым ИК-камерам, а именно, необходимо, чтобы ИК-камера работала в средневолновом ИК-диапазоне, позволяла применять узкополосные оптические фильтры в соответствии со спектром излучения пламени [6] и обладала достаточным быстродействием. Также следует учитывать, что динамические высокотемпературные газовые среды являются полупрозрачными и при измерениях необходимо определять эффективный коэффициент излучения [5]. Несмотря на упомянутые требования к ИК-камерам, методы ИК-термографии при исследовании полей температуры в динамических высокотемпературных газовых средах обладают неоспоримыми преимуществами: они позволяют отказаться от большого числа термопар, инерционность приборов ничтожна и отсутствуют возмущения, вносимые в среду (сток тепла по свободным концам термопар, нарушение теплового баланса, изменение гидродинамики течения и, как следствие, хода химических реакций), отсутствуют проблемы разрушения термопар и т.п.

При экспериментальных исследованиях плазменных струй и их воздействия на различные материалы традиционно применяются контактные методы измерения температуры среды [7] либо проводятся оценки среднemasсовых термодинамических характеристик струи по интенсивности линий излучения маркерных веществ [8]. Эти подходы обладают рядом недостатков, связанных с трудностью получения пространственного и временного распределения температуры.

Очевидно, что все упомянутые выше преимущества ИК-термографии целесообразно использовать при исследовании характеристик плазменных струй и объектов, подвергающихся их воздействию. Следует учитывать, что плазменная струя представляет собой ионизированный поток газа, спектр излучения которого зависит от состава газа и не является непрерывным, как у абсолютно черного тела (АЧТ), по излучению которого калибруются ИК-камеры. Также необходимо учитывать, что, в отличие от пламени, температура в плазменной струе существенно выше и откалибровать прибор по излучению АЧТ с такой температурой не представляется возможным. Тем не

\* Исследование выполнено в рамках государственного задания ИОА СО РАН.