

ВОЗМОЖНОСТИ МЕТОДА СПЕКТРОСКОПИИ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ (КС)

Бастин Н. А.

Самарский университет, г. Самара, 2022-01363@ssau.ru

Ключевые слова: камера сгорания, спектроскопия комбинационного рассеяния, горение

Спектроскопия комбинационного рассеяния (рамановская спектроскопия, КР-спектроскопия) – локальный неинвазивный метод исследования веществ. Анализ спектров комбинационного рассеяния света позволяет определять наличие тех или иных компонентов в смеси и температуру и концентрацию этих компонентов в исследуемой области.

Принцип действия: исследуемая область вещества (твёрдого, жидкого, газообразного) облучается лазером частотой ν_0 – это первичный пучок. В рамановской спектроскопии из всего переизлученного пучка рассматривается неупругое рассеяние – вторичный пучок с частотой ν_1 . По его спектру (у разных веществ он свой) детектируются компоненты и рассчитывается их концентрация и температура.

В первичном пучке применяется монохроматическое излучение, которое не поглощается образцом, с частотой в видимом диапазоне или ближнем инфракрасном. Чаще используют излучение с высокой частотой. Соотношение сигнал/шум при таком излучении оптимально.

Для вычисления концентраций компонентов смеси производится сравнение интенсивности спектров комбинационного рассеяния компонента с интенсивностью излучения молекул азота N_2 , присутствующих в данном объеме. Искомая концентрация:

$$n_x = n_{N_2} \cdot \frac{(I_P / I_{N_2})}{(\delta\sigma / \delta\Omega)_x / (\delta\sigma / \delta\Omega)_{N_2}}$$

Здесь в числителе – отношение интенсивностей рассеянного света компонента и азота; C – константа, учитывающая особенности приборной части. Множитель перед дробью – концентрация азота в исследуемом объеме (рассчитанная другими методами и известная). Величина $\delta\sigma / \delta\Omega$ называется дифференциальным сечением рассеяния. Она является функцией частоты первичного пучка и угла между направлением наблюдения (принимающий датчик) и направлением вектора поляризации линейно-поляризованного возбуждающего излучения.

При комбинационном рассеянии спектр в общем случае выглядит следующим образом (рис. 1):

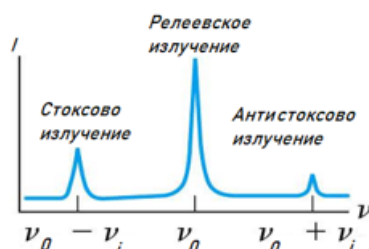


Рис. 1 – Общий вид спектра КР

Правая ветвь графика отражает случай, когда излучение вторичного пучка больше частоты ν_0 первичного пучка – данное излучение носит название антистоксова. Левая ветвь – с меньшей частотой вторичного пучка – показывает величину интенсивности при стоксовом излучении. Средний пик – релеевское излучение (частота вторичного пучка равна частоте

первичного). Зная отношение интенсивностей стоксова и антистоксова излучения, можно вычислить температуру, т. к. она является функцией данных величин:

$$T = f(I_C / I_A; \nu_0)$$

Применительно к авиационному и ракетному двигателестроению метод используется для анализа процессов горения. К основным достоинствам методов лазерной спектроскопии можно отнести точность и скорость измерений, а также отсутствие необходимости отбора проб и внесения измерительных датчиков в исследуемое тело.

Рассмотрим пример использования спектроскопии КР в исследовании горения. Для эксперимента использовалась односекторная испытательная установка камеры сгорания DLR (Немецкий Центр Авиации и Космонавтики, Кельн, 2007 г.). Камера сгорания, схематично показанная на рис. 2, представляет собой сектор кольцевой камеры сгорания. Воздух в горелку подается через впускной канал. После первичной зоны вторичный воздух подается с двух противоположных сторон корпуса. Камера сгорания оборудована окнами, обеспечивающими оптический доступ к зонам горения и смешивания.

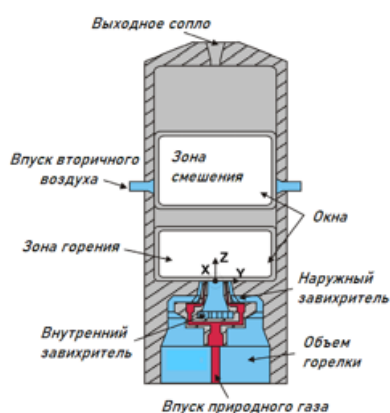


Рис. 2 – Схема экспериментальной камеры

В эксперименте используется камера $102 \times 102 \times 275$ мм. В горелках (2 шт.), обеспечивающих давление в КС 2 и 10 бар, использовался природный газ (85,0 % CH_4 , 3,3% C_2H_6 , 0,63% C_2H_2 , 9,07% N_2 и 1,69% CO_2 , а также 0,31% высших углеводородов). Соотношение воздух/топливо (AFR) было на уровне 25,5 (доля смеси $f = 0,031$). Расход в опытах был 1,4 и 7,1 г/с для соответствующих давлений. На рис. 3 представлены два спектра одиночных снимков.

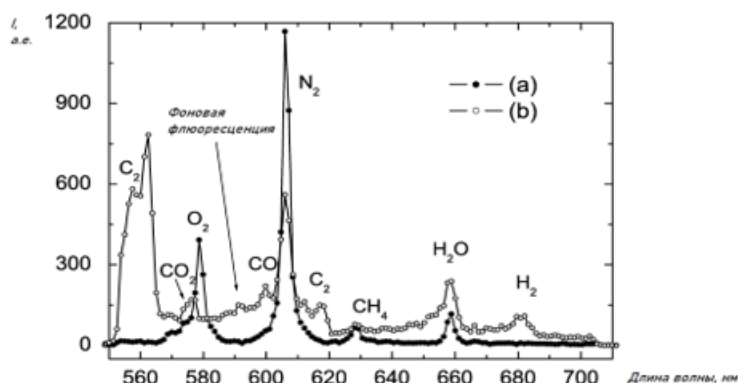


Рис. 3 – Вид экспериментальных спектров

Спектр (a) был получен вне зоны горения и показывает в основном предварительно нагретый воздух с небольшим содержанием CH_4 и H_2O . Видно, что отношение сигнала к фону достаточно высокое, и никаких проблем с оценкой данных таких спектров не возникает. Второй спектр (b) был записан в зоне пламени и имеет низкое качество.

Для получения общей количественной характеристики пламени получены распределения температуры смеси и фракции смеси для двух режимов горения при давлении 2 и 10 бар (рис. 4). Представлены данные, полученные в разных местах измерения, в диапазоне радиусов от $r = -5$ до 30 мм и на высотах $h = 10$ мм и 22 мм. Распределение от обоих языков пламени выглядят довольно похоже. Самый высокий средний коэффициент смешивания - значением $f < 0,11$ был измерен вблизи радиального расположения топливной форсунки на расстоянии $r < 7$ мм. Эта область с высоким содержанием фракции смеси расширяется вверх под небольшим углом расширения. Вблизи оси пламени средняя доля смеси составляет 0,07, что значительно превышает стехиометрические значения. Если использовать средние температуры в качестве индикатора хода реакции, становится очевидным, что при давлении 10 бар пламя разгорается быстрее.

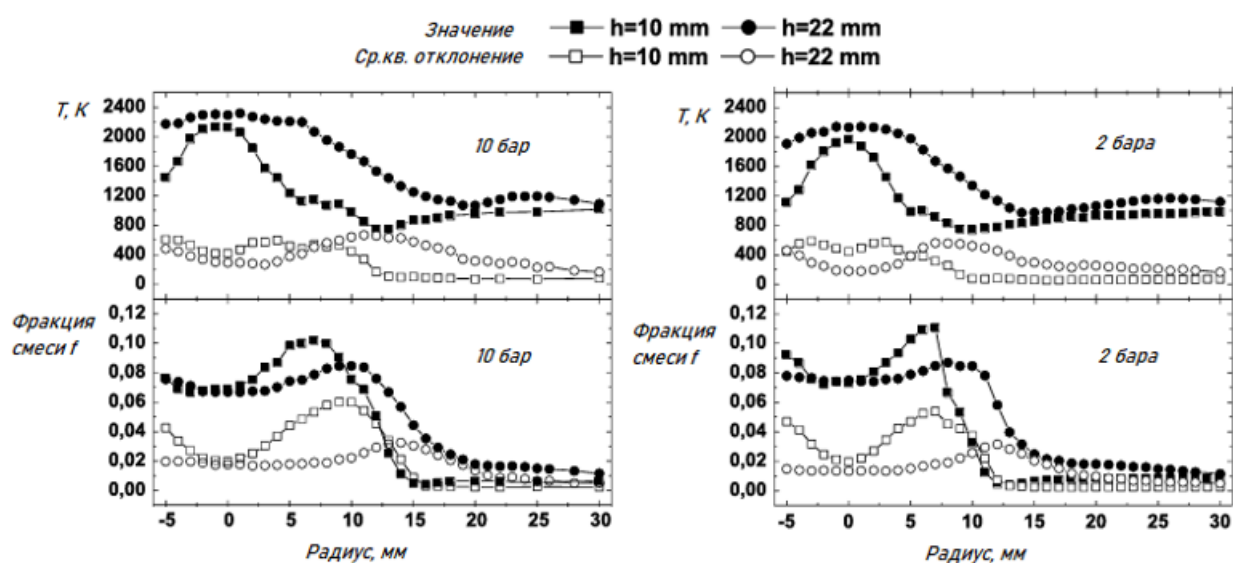


Рис. 4 – Результаты измерений

Комбинационное рассеяние света могло бы быть методом, применимым для исследования практически любых процессов горения, если бы не основное физическое ограничение: сечение комбинационного рассеяния очень мало (приблизительно в 2000 раз меньше, чем сечение рэлеевского рассеяния). Лишь появление мощных лазеров позволило использовать данный эффект для диагностики процессов горения. Однако и в этом случае только компоненты с концентрацией выше 1 % можно надежно диагностировать. Несмотря на указанные ограничения, метод сейчас используется, и с развитием приборной части в будущем будет увеличивать свою точность диагностики.

THE POSSIBILITIES OF RAMAN SPECTROSCOPY FOR THE STUDY OF COMBUSTION PROCESSES IN GAS TURBINE ENGINES

Bastin N. A. Samara University

The report provides general information about Raman spectroscopy and an example of an experiment with a combustion chamber and the results of measuring mixture parameters (temperature and mixture fraction) using Raman spectra. According to the graphs shown, the flame that flares up faster was determined.