

УДК 535.8; 536.46

## Диагностика метано-кислородного пламени при высоких давлениях с использованием когерентного антистоксова рассеяния света

К. А. Верещагин, Д. Н. Козлов, В. В. Смирнов, В. И. Фабелинский

*Методом спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) измерены распределения температур и относительных концентраций компонентов реагирующей рабочей смеси в турбулентном пламени метано-кислородной горелки непрерывного действия при давлениях до 1,2 МПа и различных коэффициентах избытка топлива. Обсуждаются возможности, особенности и ограничения нелинейно-оптической лазерной спектроскопической диагностики углеводородных пламен при высоких давлениях.*

PACS: 42.62.Fi, 81.70.Fy, 47.80.Fg, 47.70.Pq

*Ключевые слова:* когерентное антистоксово рассеяние света, КАРС, нелинейная лазерная спектроскопия, лазерная диагностика пламен, горение углеводородов, турбулентное горение.

### Введение

Разработка и применение методов локальной невозмущающей диагностики процессов горения могут значительно повысить эффективность создания камер сгорания современных двигательных установок, использующих газообразные или жидкие (криогенные) углеводородные топлива. Характерными особенностями работы таких установок являются высокие температуры (до 2500 К) и давления (до 10 МПа) в камерах сгорания, а также турбулентное перемешивание топлива и окислителя, обеспечивающее эффективное сгорание топлива.

Для задач диагностики интерес представляют, прежде всего, локальные измерения температуры и состава смеси в различных пространственных точках объема камеры сгорания и изменения этих параметров в зависимости от массовых расходов горючего и окислителя, а также давления. Пространственные распределения этих величин необ-

ходимы для изучения собственно процесса горения и влияния на него конструктивных особенностей камер сгорания, а также верификации кинетических и газодинамических расчетных моделей, используемых при их конструировании.

Методы диагностики горения с использованием лазерной спектроскопии позволяют невозмущающим образом определять температуру и состав газовых смесей по форме и относительной интенсивности линий в спектрах пробных молекул. При этом измерения флуктуаций локальной температуры и состава среды при квазистационарных условиях горения также оказываются возможными при регистрации спектров за одну лазерную вспышку в импульсно-периодическом режиме измерений.

При горении метано-кислородной смеси для определения температуры и концентраций компонентов в различных пространственных областях камеры сгорания возникает необходимость использовать спектры разных пробных молекул, а именно  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  или  $CO$ . При этом одновременная регистрация спектров нескольких молекул, например,  $CH_4$ ,  $H_2$  и  $H_2O$ , дает взаимодополняющую информацию о температуре, повышая точность термометрии, а также позволяет контролировать локальные значения и временные флуктуации относительных концентраций компонентов и полноты сгорания топлива. Такая возможность особенно актуальна в тех случаях, когда традиционные методы бесконтактной оптической диагностики (такие, например, как пирометрия или эмиссионная спектроскопия) оказываются непримени-

**Верещагин Константин Александрович**, старший научный сотрудник.

**Козлов Дмитрий Николаевич**, старший научный сотрудник.

**Смирнов Валерий Васильевич**, заведующий отделом.

**Фабелинский Виктор Иммануилович**, старший научный сотрудник.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.

Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38.

Тел. 8 (499) 135-02-97. E-mail: dnk@kapella.gpi.ru

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2016 г.

© Верещагин К. А., Козлов Д. Н., Смирнов В. В., Фабелинский В. И., 2016

мыми, и остается опираться только на результаты расчетов.

Спектроскопия когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) является признанным и широко применяемым невозмущающим методом измерений температуры и состава газовых смесей (см. обзоры [1–3]), позволяющим проводить подобные измерения с высоким пространственным ( $\sim 0,1 \text{ мм} \times 0,1 \text{ мм} \times 2 \text{ мм}$ ) и временным ( $\sim 10 \text{ нс}$ ) разрешением. Однако, несмотря на достигнутые успехи в использовании КАРС-спектроскопии, дальнейшая разработка физических основ практического применения этого метода и изучение особенностей получения количественной информации из спектров КАРС в сжатых высокотемпературных газовых средах, содержащих смесь  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  и продукты ее сгорания ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ), являются по-прежнему актуальными.

Ранее в работах [4–7] было показано, что в случае квазистационарного горения обогащенных смесей  $\text{H}_2/\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2/\text{воздух}$  и  $\text{CH}_4/\text{воздух}$  КАРС-спектроскопия колебательно-вращательных переходов с использованием молекул  $\text{H}_2$  в качестве пробных позволяет успешно осуществлять локальные измерения температуры среды за одну лазерную вспышку с точностью порядка  $\sim 5\%$  в диапазоне 2000–3000 К, а также измерять плотность числа молекул  $\text{H}_2$  в области горения. В работе [8] КАРС-спектроскопия была использована нами для изучения динамики процесса нестационарного горения смесей  $\text{H}_2/\text{O}_2$  и  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  в лабораторной камере сгорания высокого давления (до 10 МПа), работающей в импульсно-периодическом режиме.

Цель настоящей работы заключалась в развитии метода КАРС-спектроскопии для измерений

пространственных распределений температуры и состава многокомпонентной газовой среды при горении смесей  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  с различными коэффициентами избытка топлива при высоких давлениях. Апробация метода проводилась в турбулентном метано-кислородном пламени внутри закрытой лабораторной горелки непрерывного действия при температурах и давлениях, характерных для камер сгорания двигательных установок.

## Эксперимент

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В экспериментах использовался КАРС-спектрометр с широкополосной стоксовой накачкой, по своей схеме аналогичный применявшемуся нами ранее в [8]. Лазерная часть спектрометра состояла из Nd:YAG-лазера с модуляцией добротности (Coherent Radiation, Infinity), обеспечивающего с частотой повторения 10 Гц около 100–200 мДж в импульсе излучения второй гармоники ( $\lambda_p = 532 \text{ нм}$ ) с длительностью около 3 нс и спектральной шириной  $\sim 4 \times 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ , и двух лазеров на красителе. Часть излучения на длине волны 532 нм ( $\sim 20\text{--}30 \text{ мДж}$ ) использовалась для четырехволнового смешения в процессе КАРС, а остальная направлялась для накачки лазеров на красителе, длины волн излучения которых могли быть выбраны для одновременной регистрации КАРС-спектров нескольких заданных пробных молекул. Значения характерных частот комбинационных переходов пробных молекул и соответствующих длин волн стоксова  $\lambda_S$  и антистоксова  $\lambda_{aS}$  излучений, а также применявшиеся красители приведены в таблице.

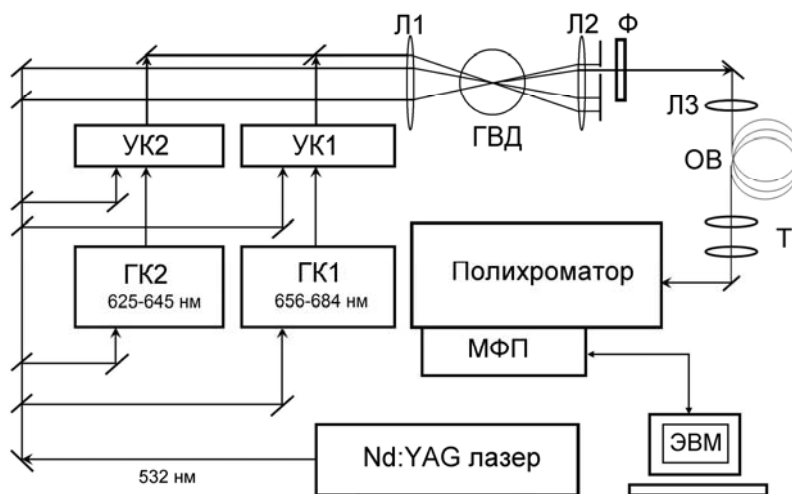


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки для диагностики пламени с использованием КАРС при широкополосной стоксовой накачке:  $\text{ГК}_{1,2}$  и  $\text{УК}_{1,2}$  — генераторы и усилители лазеров на красителе,  $\text{Л}_1\text{--}\text{Л}_3$  — линзы,  $\Phi$  — узкополосный фильтр,  $\text{ОВ}$  — оптической волокну,  $\text{T}$  — телескоп,  $\text{МФП}$  — матричный фотоприемник,  $\text{ЭВМ}$  — персональный компьютер,  $\text{ГВД}$  — горелка высокого давления.

Таблица

| Молекула                         | Частота перехода, $\text{см}^{-1}$ | Длина волны $\lambda_S$ , нм | Длина волны $\lambda_{aS}$ , нм | Краситель  |
|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|------------|
| $\text{H}_2$ ( $Q_3$ )           | 4126                               | 682                          | 436                             | Пиридин 1  |
| $\text{H}_2\text{O}$ ( $\nu_1$ ) | 3600                               | 658                          | 447                             | Пиридин 1  |
| $\text{CH}_4$ ( $\nu_1$ )        | 2915                               | 630                          | 461                             | ДСМ        |
| $\text{CO}_2$ ( $\nu_1$ )        | 1285                               | 571                          | 498                             | Родамин 6G |
| $\text{H}_2$ ( $S_4$ )           | 1246                               | 570                          | 499                             | Родамин 6G |

Оба лазера на красителе были выполнены по схеме генератор-усилитель и являлись безрезонаторными источниками безмодового широкополосного усиленного излучения люминесценции. При ширинах спектра 200–300  $\text{см}^{-1}$  (FWHM) энергии в импульсе составляли 1,5–3 мДж.

Пучки накачки, с совмещенными во времени импульсами излучения, скрещивались в 2D- или 3D-конфигурациях четырехволнового взаимодействия (т.н. BOXCARS [9]) и фокусировались в исследуемый объем линзой с фокусным расстоянием  $f = 300$  мм. Продольное пространственное разрешение, определяемое как длина, на которой генерируется более 90 % энергии импульса излучения КАРС, составляло  $\approx 2,5$  мм.

После коллимации и спектральной и пространственной фильтрации прошедшего через пламя пучка антистоксова излучения оно фокусировалось в кварцевое волокно диаметром 400 мкм и длиной 6 м для передачи к полихроматору. Полный коэффициент пропускания волокна и передающей оптики достигал 15 %.

Излучение КАРС, диспергированное полихроматором (Jobin-Yvon, HR460) с фокусным расстоянием 0,5 м и голографической решеткой 1200 штр/мм, регистрировалось матричным фотоприемником со стробируемым усилителем яркости (Andor Technology Ltd, DH-720-18F-03). Спектральная ширина аппаратной функции системы регистрации была около 5  $\text{см}^{-1}$ , что позволяло разрешить узкие колебательно-вращательные линии  $Q$ -ветви КАРС-спектра  $\text{H}_2$ . Спектральные данные усреднялись по 30 или 100 спектрам, каждый из которых был зарегистрирован за одну лазерную вспышку.

Лабораторная горелка непрерывного действия, в которой исследовалось горение смеси  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ , представляла собой камеру сгорания высокого давления из нержавеющей стали с оптическими окнами, размещенную на столе с трехкоординатным перемещением. Горючее и окислитель независимо поступали в камеру сгорания через 35 квази coaxialных инжекторов, размещенных в виде матрицы шестигранной формы с характерным поперечным размером около 10 мм на охлаждаемой водой медной пластине. Высокая скорость

инъекции обеспечивала эффективное турбулентное перемешивание струй горючего и окислителя в потоке газа. Требуемое давление в камере обеспечивалось путем ее наддува инертным буферным газом (азотом) и регулировалось установленным на выходе из камеры дросселем. Более детально конструкция горелки и особенности работы с ней описаны в [10].

Измерения проводились при постоянном расходе горючего  $Q_{\text{CH}_4} = 3$  станд. л/мин и расходах окислителя  $Q_{\text{O}_2} = 1-7$  станд. л/мин (стехиометрическое отношение расходов равно  $Q_{\text{O}_2}/Q_{\text{CH}_4} = 2$ ). При этом расходы буферного газа могли, в зависимости от давления в камере, достигать величины  $Q_{\text{N}_2} = 20$  станд. л/мин.

При возрастании давления в камере сгорания происходило значительное изменение размеров пламени. Так, характерные размеры видимого пламени по высоте, вдоль оси горелки, достигали 60–70 мм при 0,1 МПа и уменьшались до 25–30 мм при 1,2 МПа, при этом поперечный размер пламени составлял около 10–15 мм.

## Результаты и их обсуждение

### *Спектральная информация, получаемая при различных условиях в разных областях пламени*

КАРС-спектры основных молекулярных компонентов в пламени  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ , примеры которых приведены в нормированном виде на рис. 2, располагаются в двух спектральных диапазонах. Данные спектры были зарегистрированы при давлении  $P = 1,2$  МПа и стехиометрии  $\Phi^* = 1,2$  (группа спектров на рисунке слева) и  $P = 1,0$  МПа,  $\Phi = 1,0$  (группа спектров на рисунке справа) в различных точках внутри пламени на его оси.

\*  $\Phi$  — характеризующий стехиометрию коэффициент избытка топлива, который определяется как отношение установленных объемных расходов горючего и окислителя, нормированное на их стехиометрическое соотношение.

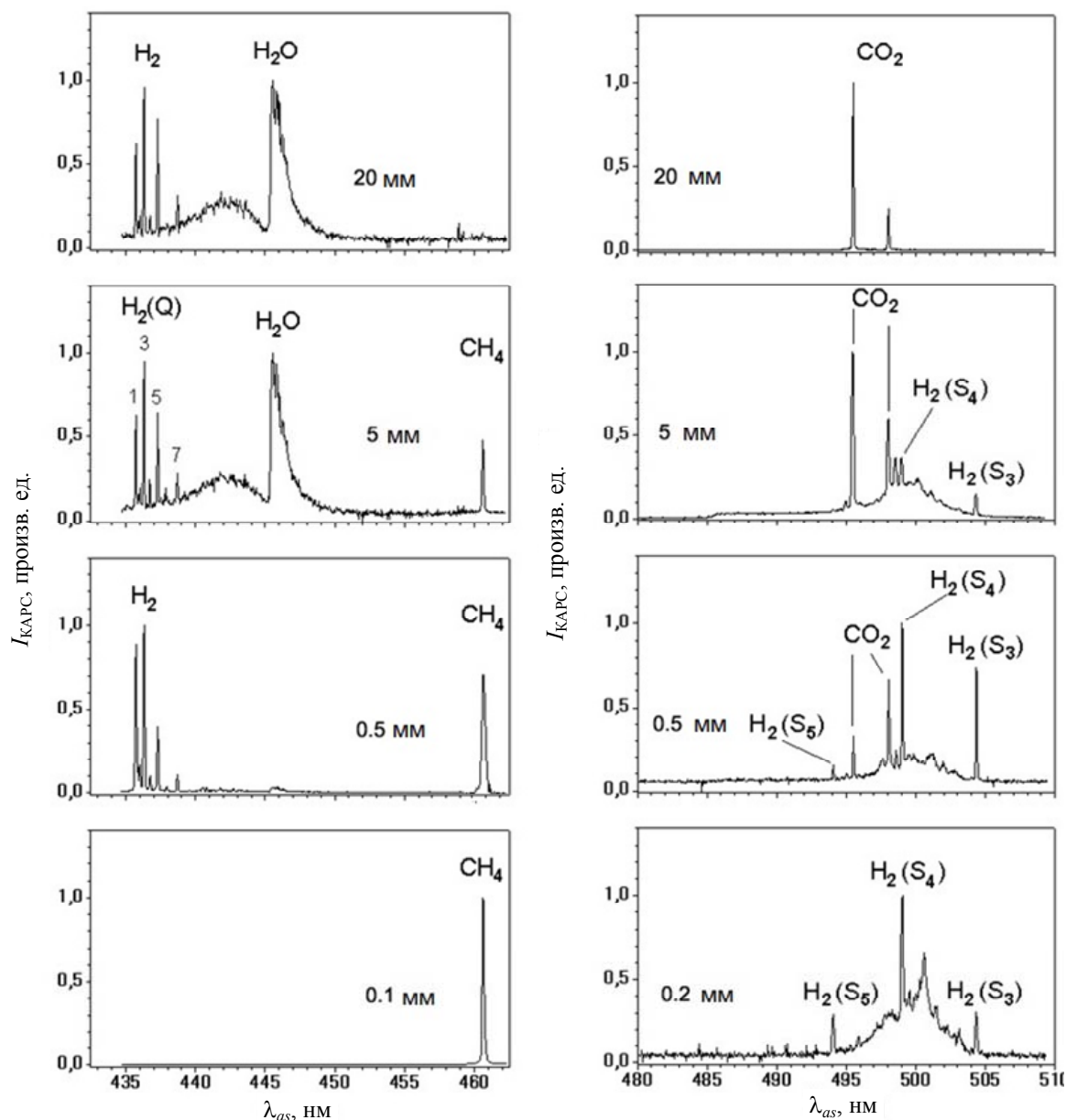


Рис. 2. Примеры КАРС-спектров, зарегистрированных на оси метано-кислородного пламени на различном удалении от пластины с инжекторами (указано на рисунке). Слева приведены спектры в области 433–463 нм при давлении  $P = 1,2$  МПа и стехиометрии  $\Phi = 1,2$  ( $Q_{O_2}/Q_{CH_4} = 5/3$ ), содержащие линии  $Q$ -ветви колебательно-вращательных переходов молекул  $H_2$ ,  $Q$ -ветвь колебания  $\nu_1$  молекул  $H_2O$  и  $Q$ -ветвь колебания  $\nu_1$  молекул  $CH_4$ . Справа –  $Q$ -ветви колебательно-вращательных переходов  $CO_2$  и отдельные линии  $S$ -ветви вращательных переходов молекул  $H_2$  в области 480–510 нм при  $P = 1,0$  МПа и  $\Phi = 1,0$  ( $Q_{O_2}/Q_{CH_4} = 2$ ).

В области 433–463 нм спектры, зарегистрированные с помощью двух широкополосных лазеров на различных красителях, состоят из узких линий колебательно-вращательных переходов в полосе  $\nu = 0 \rightarrow \nu = 1$  ( $Q$ -ветви) молекул  $H_2$ , широкой неразрешенной полосы  $Q$ -ветви колебания  $\nu_1$  молекул  $H_2O$  и узкой  $Q$ -ветви колебания  $\nu_1$  молекул  $CH_4$ . Трансформация спектров в левой части рис. 2 показывает, что спектральная линия топлива — молекул  $CH_4$  — постепенно уменьшаясь, исчезает на расстояниях, больших 15 мм от поверхности пластины с инжекторами. При этом молекулы  $H_2$  — продукт термического разложения

молекул  $CH_4$  — появляются уже вблизи поверхности пластины с инжекторами и в случае использования обогащенной горючей смеси присутствуют в области горения практически всюду. Полосу  $Q$ -ветви колебания  $\nu_1$  молекул  $H_2O$  — продуктов сгорания — можно также обнаружить во всех точках, где происходит горение.

На том же рисунке справа представлены спектры, зарегистрированные в области 480–510 нм с помощью одного широкополосного лазера на красителе. В спектрах наблюдаются узкие линии вращательных переходов  $S$ -ветви молекул  $H_2$ , образующихся при пиролизе метана, а также

$Q$ -ветвей колебаний  $\nu_1/2\nu_2$  Ферми-диады молекул  $\text{CO}_2$  — продуктов сгорания — и соответствующих им «горячих» полос. На больших расстояниях от плоскости инъекции молекулы  $\text{H}_2$  отсутствуют, так как в данном случае установлено стехиометрическое соотношение расходов горючего и окислителя.

Таким образом, из рис. 2 видно, что при перемещении точки зондирования вдоль оси газового потока в камере спектры КАРС в пламени  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  трансформируются по мере увеличения расстояния от плоскости инъекции. Эти трансформации определяются изменениями температуры и состава газовой смеси внутри области горения, которые могут быть найдены из регистрируемых спектров.

### **Характерные особенности спектров и их использование для локального определения температуры и состава газовой среды.**

Определение температуры в метано-кислородном пламени из КАРС-спектров требует различных подходов при горении смесей с разным соотношением расходов горючего и окислителя. Как видно из спектров, приведенных на рис. 2, измерения температуры газа в богатых смесях наиболее удобно проводить, используя интенсивности хорошо разрешенных вращательных линий  $^{0-1}Q$ -ветви КАРС-спектров молекул  $\text{H}_2$ .

Регистрируемые спектры  $Q$ -ветви колебательно-вращательных и  $S$ -ветви чисто вращательных переходов молекул  $\text{H}_2$  в широком диапазоне давлений представляют собой наборы узких, достаточно далеко разнесенных линий одинаковой ширины, определяемой шириной аппаратной функции спектрометра. Методические аспекты корректного определения температур при повышенных давлениях в камере сгорания с использованием интегральных интенсивностей линий  $^{0-1}Q$ -ветви молекул  $\text{H}_2$  подробно обсуждались при анализе подходов к термометрии горения смеси  $\text{H}_2/\text{O}_2$  [11–15]. Отмечалось, что по мере повышения давления линии становятся однородно уширенными, и при определении температуры требуется учет  $J$ -зависимости коэффициентов столкновительного уширения, определяемых температурой и составом окружающего газа. В [12–14, 16] для ряда смесей эти коэффициенты были измерены при высоких температурах, что позволило построить модели их температурной зависимости.

Учитывая тот факт, что коэффициенты столкновительного уширения линий  $\text{H}_2$  молекулами  $\text{H}_2\text{O}$  почти на порядок превышают коэффициенты уширения другими продуктами сгорания, и предполагая, что концентрация паров воды в диагностируемых областях пламени существенно больше

концентраций остальных компонентов смеси, для корректного определения температуры достаточно учесть найденные в [13–16] температурные зависимости коэффициентов столкновительного уширения колебательно-вращательных линий  $^{0-1}Q$ -ветви молекул  $\text{H}_2$ , обусловленного молекулами  $\text{H}_2\text{O}$ , как это и было сделано в настоящей работе. Обойти указанные трудности удастся экспериментально, а именно, с помощью продемонстрированного нами ранее [17] подхода, основанного на одновременной, за одну лазерную вспышку, регистрации интегральных интенсивностей и форм контуров отдельных линий  $^{0-1}Q$ -ветви молекул  $\text{H}_2$ , которая позволяет учесть все факторы их уширения.

Поскольку молекулы  $\text{H}_2$  не при всех стехиометриях образуются в достаточных количествах, а также присутствуют не во всех областях пламени, то в качестве альтернативы, особенно при горении обедненных смесей, как для нахождения температуры, так и для определения концентрации водяного пара могут использоваться спектры  $Q$ -ветви колебания  $\nu_1 = 3652 \text{ см}^{-1}$  молекул  $\text{H}_2\text{O}$  в диапазоне  $3500\text{--}3700 \text{ см}^{-1}$ . Заметно искаженная интерференцией с нерезонансным фоном, форма этих неоднородно уширенных спектров с нерегулярной вращательной структурой [18–21] зависит от температуры и локального состава газовой среды. Для определения температуры по спектрам молекул  $\text{H}_2\text{O}$  можно использовать подход, разработанный в [22] и развитый в [23, 24], где при расчете КАРС-спектров учитывались 3342 колебательно-вращательных перехода в области  $3300\text{--}3640 \text{ см}^{-1}$ , принадлежащих колебательным полосам  $(000)\rightarrow(100)$  и  $(010)\rightarrow(110)$ . Положения энергетических уровней связанных этими переходами состояний заимствованы из данных, приведенных в работах [25, 26]. Значения температур определяются путем подгонки экспериментальных спектров теоретическими, рассчитанными с определенным шагом по температуре. В программе расчета спектров учитываются коэффициенты уширения линий и эффекты спектрального обмена, обусловленные столкновениями  $\text{H}_2\text{O}\text{--}\text{H}_2\text{O}$ .

Форма линии  $Q$ -ветви колебания  $\nu_1 = 2917 \text{ см}^{-1}$  молекул  $\text{CH}_4$ , присутствующей в спектрах и имеющей относительно небольшую ширину ( $\text{FWHM} \approx 16 \text{ см}^{-1}$ ), определяется достаточно сложной структурой колебательно-вращательных переходов [27], и, хотя и является весьма чувствительной к изменениям температуры [28], требует проведения громоздких расчетов при моделировании [29]. Помимо этого метан полностью разлагается при  $T > 1500 \text{ К}$ . Таким образом, использование спектров  $Q$ -ветви колебания  $\nu_1$  молекул  $\text{CH}_4$  для определения температуры не является оправданным в рассматриваемой ситуации.

В тоже время в бедных смесях для термометрии газа могут быть использованы интенсивности линий  $Q$ -ветвей колебаний  $\nu_1/2\nu_2$  Ферми-диады молекул  $\text{CO}_2$  и их «горячих» полос ( $\nu_2 \rightarrow \nu_2 + \nu_1$ ,  $\nu_2 \rightarrow \nu_2 + 2\nu_2$ ). Эти узкие линии с наблюдаемыми в КАРС-спектрах ширинами, практически равными ширине аппаратной функции спектрометра (как и у молекул  $\text{H}_2$ ), на самом деле имеют разные вращательные структуры и ширины [30]. При этом следует отметить, что уже при давлениях свыше 0,1 МПа за счет столкновительного сужения в колебательных полосах характерные черты вращательной структуры исчезают и линии становятся однородно уширенными, что существенно упрощает процедуру определения температуры. Таким образом, отношения интегральных интенсивностей линий Ферми-диады и «горячих» полос молекул  $\text{CO}_2$ , после вычитания нерезонансного фона, можно использовать для термометрии в областях умеренных температур [31], особенно при термометрии обедненных смесей.

Относительные локальные концентрации (плотности числа частиц) выбранных для примера компонентов газовой среды — молекул  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$  — рассчитывались путем извлечения квадратного корня из пиковых интенсивностей отвечающих им линий в спектрах КАРС за вычетом уровня нерезонансного фона. При этом для молекул  $\text{CH}_4$  использовалась линия  $Q$ -ветви колебания  $\nu_1$ , а для молекул  $\text{H}_2$  — вращательная линия  $^{0-1}Q_3$ . В случае  $\text{H}_2$  полученные величины дополнительно умножались на коэффициент, учитывающий заселенность нижнего вращательного состояния с  $J = 3$  при измеренной температуре в данной точке. Найденные таким образом величины с точностью до фактора, зависящего от ширины соответствующей линии, пропорциональны концентрации молекул, обеспечивающих резонансное рассеяние в эту линию. Более точное определение как относительных, так и абсолютных локальных концентраций компонентов смеси по интенсивности линии в КАРС-спектрах при найденной температуре и известном давлении в камере сгорания требует знания формы контура этой линии, зависящего от указанных параметров и локального состава среды, или ее моделирования.

### Пространственные распределения измеренных величин

В качестве примера на рис. 3 представлены найденные из спектров КАРС при различных давлениях и стехиометриях температуры  $T$  и нормированные на максимальное значение относительные концентрации  $N$  молекул  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$  вдоль газового потока на его оси. Их величины показаны в зависимости от расстояния  $L$  от поверхности пластины с инжекторами. Напомним, что температуры определялись по интегральным интенсивностям вращательных линий  $^{0-1}Q_1$ - $^{0-1}Q_7$  спектра молекул  $\text{H}_2$ .

С учетом сделанных выше предположений и упрощений приведенные на рис. 3 зависимости позволяют качественно проследить такие изменения с ростом давления характеристик области горения как сжатие и смещение зоны разогрева и выгорания  $\text{CH}_4$  и появления  $\text{H}_2$  — продукта пиролиза метана; повышение температуры вблизи пластины с инжекторами; приближение фронта пламени к поверхности пластины; возрастание скорости спада температуры вниз по потоку после достижения максимального значения за счет передачи части выделяющегося тепла буферному газу.

Примеры полученных из спектров КАРС изменений локальной температуры газа и относительных концентраций молекул  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$  на оси пламени в зависимости от стехиометрии  $\Phi$  ( $Q_{\text{O}_2}/Q_{\text{CH}_4} = 2/\Phi$ ) показаны на рис. 4 для расстояния  $L = 10$  мм от поверхности пластины с инжекторами и давления  $P = 0,2$  МПа. Из приведенных зависимостей видно, что в зондируемой точке при данном давлении температура газа возрастает при уменьшении степени обогащения смеси, достигая максимального значения при стехиометрическом горении, т.е. при  $\Phi = 1$ . В то же время концентрация  $\text{CH}_4$  быстро падает, а концентрация  $\text{H}_2$  — растет за счет повышения с температурой интенсивности пиролиза. При стехиометриях  $\Phi < 2$  метан эффективно сгорает уже при  $L \leq 5$  мм (см. рис. 3, а), так что концентрация пиролитического водорода при  $L = 10$  мм резко уменьшается по мере дальнейшего обеднения смеси.

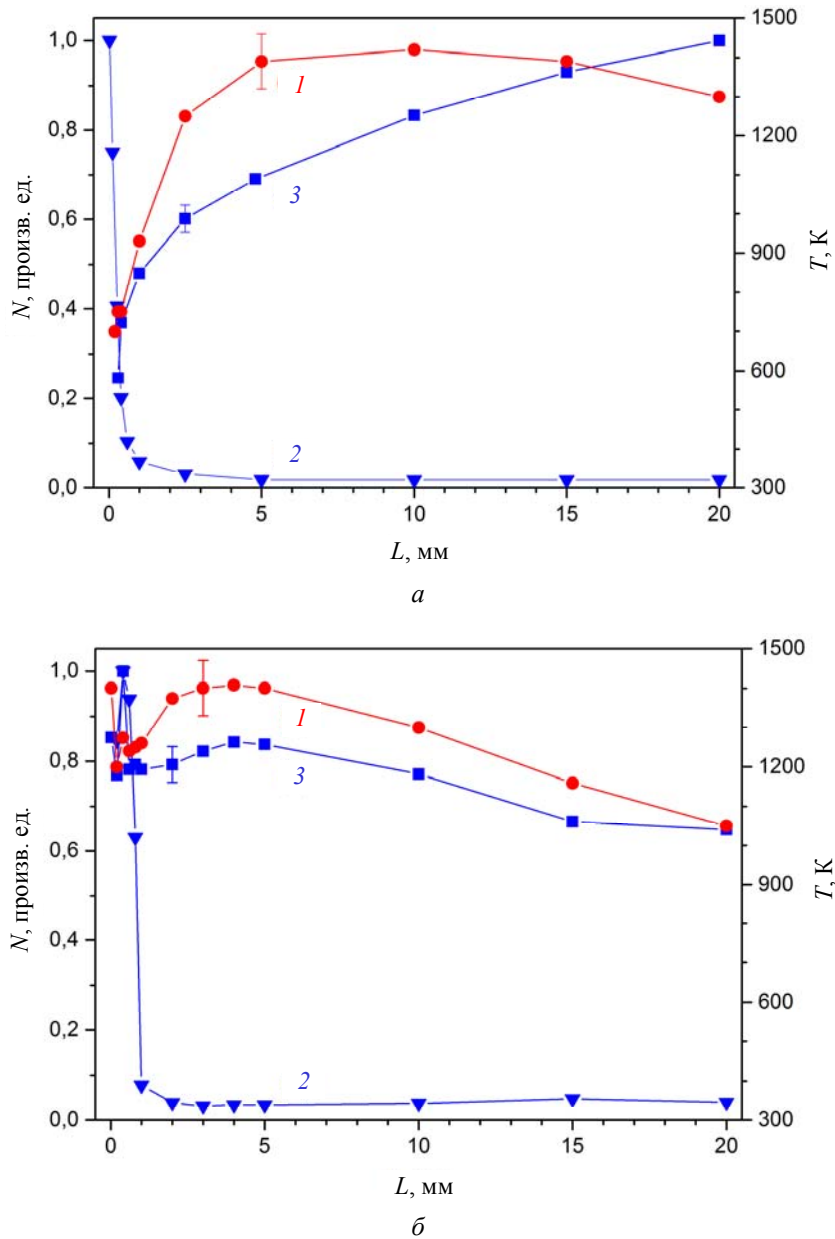


Рис. 3. Распределение температуры (графики 1) и относительных концентраций молекул  $\text{CH}_4$  (графики 2) и  $\text{H}_2$  (графики 3) вдоль оси пламени при давлении  $P=0,2$  МПа и стехиометрии  $\Phi=2$  ( $Q_{\text{O}_2}/Q_{\text{CH}_4}=1$ ) (а) и  $P=1,2$  МПа и  $\Phi=1,2$  ( $Q_{\text{O}_2}/Q_{\text{CH}_4}=5/3$ ) (б). Относительные концентрации нормированы на свои максимальные значения. Показаны характерные погрешности приведенных величин; соединительные линии на графиках проведены для удобства восприятия.

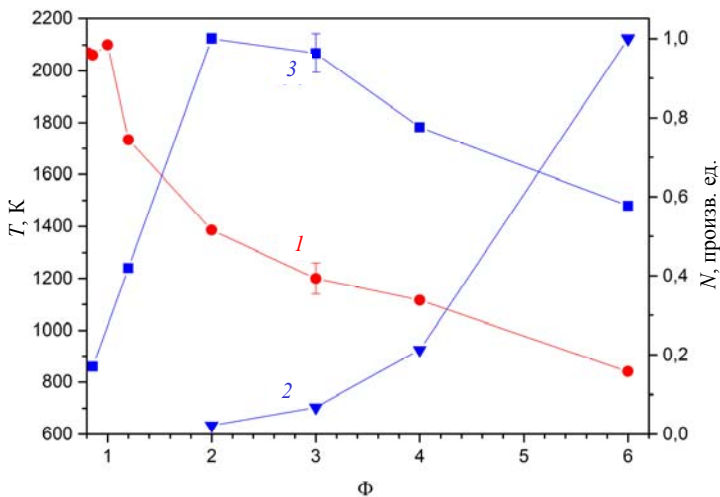


Рис. 4. Изменения температуры (график 1) и относительных концентраций молекул  $\text{CH}_4$  (график 2) и  $\text{H}_2$  (график 3) в зависимости от стехиометрии  $\Phi$  для расстояния 10 мм от пластины с инжекторами и давления  $P=0,2$  МПа. Относительные концентрации нормированы на свои максимальные значения. Показаны характерные погрешности приведенных величин; соединительные линии на графиках проведены для удобства восприятия.

## Заключение

В работе исследованы возможности и особенности нелинейно-оптической лазерной диагностики локальных температуры и состава газовой среды метано-кислородного пламени при высоких давлениях на основе спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света. Исследования проведены при горении смесей  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  с различными коэффициентами избытка топлива при давлениях до 1,2 МПа в горелке непрерывного действия.

Представлены результаты экспериментов, в которых в различных пространственных точках реагирующего потока зарегистрированы колебательно-вращательные КАРС-спектры молекул  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ , и  $\text{CO}_2$  и определены значения локальной температуры смеси и относительных концентраций таких ее компонентов как  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2$ .

Изучена возможность одновременной (за время одного лазерного импульса длительностью 3 нс) регистрации спектров нескольких молекулярных компонентов реагирующей смеси в одной и той же пространственной точке. При этом продемонстрировано получение взаимодополняющей информации о нескольких локальных параметрах потока.

Результаты работы показывают возможности применения КАРС-спектроскопии для локальной диагностики углеводородных пламен в камерах сгорания двигательных установок при высоких давлениях, исследования турбулентного смешения потоков горючего и окислителя и процессов горения и термического разложения углеводородов, измерения профилей температур и относительных концентраций компонентов газовой среды непосредственно в области горения, выявления возникающих в этой области холодных и перегретых зон, неоднородностей потоков топлива и т.д.

Реализация метода КАРС-диагностики турбулентных метано-кислородных пламен при высоких давлениях и полученные экспериментальные данные дают основания считать, что проведение подобных измерений может стать важным этапом разработки камер сгорания двигательных установок, обеспечивая исследования новых подходов к организации горения, изучение влияния конструктивных особенностей камер на процесс горения, а также верификацию моделей кинетических и газодинамических расчетов реагирующих потоков.

*Авторы признательны сотрудникам Германского аэрокосмического центра в Лампольшаузене (DLR Lampoldshausen) В. Клауссу и Д. Н. Клименко — за помощь в подготовке экспериментов и М. Ошвальду — за полезные обсуждения, а также О. М. Стельмаху — за участие в проведении измерений и обсуждение результатов.*

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-08-0075-а), а также Президиума РАН, в рамках Программы фундаментальных исследований № 46П.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ниблер Дж., Найтмен Г. Спектроскопия комбинационного рассеяния света в газах и жидкостях. — М.: Мир. 1982.
2. Greenhalgh D. A. *Advances in Nonlinear Spectroscopy*. Vol. 15. — Chichester: John Wiley & Sons, 1988.
3. Eckbreth A. C. *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species*. — Amsterdam: Gordon and Breach, 1996.
4. Stricker W., Woyde M., Lueckerath R., and Bergmann V. // *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* 1993. Vol. 97. P. 1608.
5. Bergmann V., Stricker W. // *Appl. Phys.* 1995. Vol. B 61. P. 49.
6. Clauss W., Fabelinsky V. I., Kozlov D. N., Smirnov V. V., Stel'makh O. M., and Vereschagin K. A. // *Appl. Phys. B*. 2000. Vol. B70. P. 127.
7. Hussong J., Lueckerath R., Stricker W., Bruet X., Joubert P., Bonamy J., Robert D. // *Appl. Phys. B*. 2001. Vol. B 73. P. 165.
8. Верецагин К. А., Смирнов В. В., Стельмах О. М., Фабелинский В. И. // *Квантовая электроника*. 2012. Т. 42. № 1. С. 44.
9. Eckbreth A. C. // *Appl. Phys. Lett.* 1978. Vol. 32. No. 7. P. 421.
10. Верецагин К. А., Козлов Д. Н., Смирнов В. В., Стельмах О. М., Фабелинский В. И. // *TBT*. 2017. Т. 55. № 1. С. 1.
11. Rahn L. A., Farrow R. L., and Rosasco G. J. // *Phys. Rev.* 1991. Vol. A43. P. 6075.
12. Sinclair P. M., Berger J.-Ph., Michaut X., Saint-Loup R., Chaux R., and Berger H. // *Phys. Rev. A*. 1996. Vol. 54. P. 402.
13. Michaut X., Berger J.-Ph., Saint-Loup R., Chaussard F., Berger H. *Actes du Colloque de Synthèse du Groupe de Recherche CNES/CNRS/ONERA/SNECMA*. — Toulouse: Cepadues Editions. 2001.
14. Clauss W., Klimenko D. N., Oswald M., Vereschagin K. A., Smirnov V. V., Stel'makh O. M., and Fabelinsky V. I. // *J. Raman Spectr.* 2002. Vol. 33. P. 906.
15. Vereschagin K. A., Smirnov V. V., Stel'makh O. M., Fabelinsky V. I., Clauss W., Klimenko D. N., Oswald M., and Vereschagin A. K. // *J. Raman Spectr.* 2005. Vol. 36. P. 134.
16. Vereschagin K. A., Vereschagin A. K., Smirnov V. V., Stel'makh O. M., Fabelinsky V. I., Clauss W., and Oswald M. // *J. Raman Spectr.* 2008. Vol. 39. P. 722.
17. Vereschagin K. A., Smirnov V. V., Stel'makh O. M., Fabelinsky V. I., Clauss W., and Oswald M. // *J. Raman Spectr.* 2010. Vol. 41. P. 902.
18. Rothman L. S., Gamache R. R., Tipping R. H., Rinsland C. P., Smith M. A. H., Chris Benner D., Malathy Devi V., Flaud J.-M., Camy-Peyret C., Perrin A., Goldman A., Massie S., Brown L. R., and Toth R. A. // *JQSRT* 1992. Vol. 48. P. 469.
19. Avila G., Fernandez J. M., Mate B., Tejada G., and Montero S. // *J. Mol. Spectrosc.* 1999. Vol. 196. P. 77.
20. Greenhalgh D. A., Rahn L. A. // *J. Raman Spectrosc.* 1990. Vol. 21. P. 847.
21. Porter F. M., Williams D. R. // *Appl. Phys.* 1992. Vol. B54. P. 103.
22. Grisch F., Pealat M. // *J. Raman Spectrosc.* 1994. Vol. 25. P. 145.
23. Grisch F., Bouchardy P., Vingert L., Smirnov V. V., Stel'makh O. M., Clauss W., Oswald M. // *Progress in Astronautics and Aeronautics*. 2004. Vol. 200. Ch. 10. P. 369.



24. Fabelinsky V. I., Smirnov V. V., Stel'makh O. M., Vereschagin K. A., Clauss W., Manfretti C., Sender J., Oswald M. // *J. Raman Spectr.* 2010. Vol. 41. P. 890.

25. Flaud J. M., Camy-Peyret C., and Maillard J. P. // *Molecular Physics.* 1976. Vol. 32. P. 499.

26. Tennyson J., Zobov N. F., Williamson R., Polyansky O. L., and Bernath P. F. // *J. Phys. Chem. Ref. Data.* 2001. Vol. 30. P. 735.

27. Jourdanneau E., Chaussard F., Saint-Loup R., Gabard T., Berger H. J. // *Mol. Spectrosc.* 2005. Vol. 233. P. 219.

28. Jourdanneau E., Gabard T., Chaussard F., Saint-Loup R., Berger H., Bertseva E., Grisch F. // *J. Mol. Spectrosc.* 2007. Vol. 246. P. 167.

29. Lavorel B., Millot G., Saint-Loup R., Berger H., Bonamy L., Bonamy J., Robert D. // *J. Chem. Phys.* 1990. Vol. 93. P. 2176.

30. Lavorel B., Millot G., Saint-Loup R., Berger H., Bonamy L., Bonamy J., Robert D. // *J. Chem. Phys.* 1990. Vol. 93. P. 2185.

31. Brueggemann D., Wies B., Zhang X. X., Henze T., and Knoche K.-F. *Combustion Flow Diagnostics*, — Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. 1992.

## Diagnosics of methane-oxygen flame at high pressures using coherent anti-Stokes Raman scattering

K. A. Vereschagin, D. N. Kozlov, V. V. Smirnov, and V. I. Fabelinsky

Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences  
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia

Received November 18, 2016

***Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS) spectroscopy has been employed to measure spatial distributions of temperature and relative concentrations of components of a reactive gas medium in a turbulent flame of a continuously-running methane-oxygen high-pressure burner at pressures up to 1.2 MPa and various mixing equivalence ratios. Feasibilities, peculiarities and limitations of nonlinear laser spectroscopic diagnostics of high-pressure hydrocarbon flames are discussed.***

PACS: 42.62.Fi, 81.70.Fy, 47.80.Fg, 47.70.Pq

**Keywords:** coherent anti-stokes Raman scattering, CARS, nonlinear laser spectroscopy, laser flame diagnostics, hydrocarbon combustion, turbulent combustion.

### REFERENCES

1. J. W. Nibler, G. V. Knighten Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy, in *Topics in Current Physics. Raman Spectroscopy of Gases and Liquids*, ed. by A. Weber (Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1979), pp. 253–299.

2. D. A. Greenhalgh, in *Advances in Nonlinear Spectroscopy, vol. 15*, ed. by R. J. H. Clark and R. E. Hester (John Wiley & Sons, Chichester, 1988), pp. 193–251.

3. A. C. Eckbreth, in *Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species. Second Edition*, ed. by W. A. Sirignano (Gordon and Breach, Amsterdam B.V., 1996), pp. 221–300.

4. W. Stricker, M. Woyde, R. Lueckerath, and V. Bergmann, *Ber. Bunsenges. Phys. Chem.* **97**, 1608 (1993).

5. V. Bergmann and W. Stricker, *Appl. Phys.* **B 61**, 49 (1995).

6. W. Clauss, V. I. Fabelinsky, D. N. Kozlov, V. V. Smirnov, O. M. Stel'makh, and K. A. Vereschagin, *Appl. Phys.* **B 70**, 127 (2000).

7. J. Hussong, R. Lueckerath, W. Stricker, X. Bruet, P. Joubert, J. Bonamy, and D. Robert, *Appl. Phys.* **B 73**, 165 (2001).

8. K. A. Vereschagin, V. V. Smirnov, O. M. Stel'makh, and V. I. Fabelinsky, *Quantum Electronics*, **42**, 44 (2012).

9. A. C. Eckbreth, *App. Phys. Lett.* **32**, 421 (1978).

10. K. A. Vereschagin, D. N. Kozlov, V. V. Smirnov, O. M. Stel'makh, and V. I. Fabelinsky. *High Temperature*, **55**, 1 (2017).

11. L. A. Rahn, R. L. Farrow, and G. J. Rosasco. *Phys. Rev. A* **43**, 6075 (1991).

12. P. M. Sinclair, J.-Ph. Berger, X. Michaut, R. Saint-Loup, R. Chaux, and H. Berger. *Phys. Rev. A* **54**, 402 (1996).

13. X. Michaut, J.-Ph. Berger, R. Saint-Loup, F. Chaussard, and H. Berger, in: *Combustion dans les Moteurs Fuseses, 26–28 June 2001, Actes du Colloque de Synthèse du Groupe de Recherche CNES/CNRS/ONERA/SNECMA*. —Cepadues Editions: Toulouse, 2001.

14. W. Clauss, D. N. Klimenko, M. Oswald, K. A. Vereschagin, V. V. Smirnov, O. M. Stel'makh, and V. I. Fabelinsky, *J. Raman Spectrosc.* **33**, 906 (2002).

15. K. A. Vereschagin, V. V. Smirnov, O. M. Stel'makh, V. I. Fabelinsky, W. Clauss, D. N. Klimenko, M. Oswald, and A. K. Vereschagin, *J. Raman Spectrosc.* **36**, 134 (2005).

16. K. A. Vereschagin, A. K. Vereschagin, V. V. Smirnov, O. M. Stel'makh, V. I. Fabelinsky, W. Clauss, and M. Oswald, *J. Raman Spectrosc.* **39**, 722 (2008).

17. K. A. Vereschagin, V. V. Smirnov, O. M. Stel'makh, V. I. Fabelinsky, W. Clauss, and M. Oswald, *J. Raman Spectrosc.* **41**, 902 (2010).

18. L. S. Rothman, R. R. Gamache, R. H. Tipping, C. P. Rinsland, M. A. H. Smith, D. Chris Benner, V. Malathy Devi, J.-M. Flaud, C. Camy-Peyret, A. Perrin, A. Goldman, S. Massie, L. R. Brown, and R. A. Toth, *JQSRT* **48**, 469 (1992).
19. G. Avila, J. M. Fernandez, B. Mate, G. Tejada, and S. Montero, *J. Mol. Spectrosc.* **196**, 77 (1999).
20. D. A. Greenhalgh and L. A. Rahn, *J. Raman Spectrosc.* **21**, 847 (1990).
21. F. M. Porter and D. R. Williams, *Appl. Phys.* **B54**, 103 (1992).
22. F. Grisch and M. Pealat, *J. Raman Spectrosc.* **25**, 145 (1994).
23. F. Grisch, P. Bouchardy, L. Vingert, W. Clauss, M. Oswald, V. V. Smirnov, and O. M. Stel'makh. *Coherent Anti-Stokes Raman Scattering Measurements at High Pressure in Cryogenic LOX/GH2 Jet Flames. Progress in Astronautics and Aeronautics*, ed. by Vigor Young, Vol. 200. Chap. 10, 369 (2004).
24. V. I. Fabelinsky, V. V. Smimov, O. M. Stel'makh, K. A. Vereschagin, W. Clauss, C. Manfletti, J. Sender and M. Oswald, *J. Raman Spectrosc.* **41**, 890 (2010).
25. J. M. Flaud, C. Camy-Peyret, and J. P. Maillard, *Molecular Physics* **32**, 499 (1976).
26. J. Tennyson, N. F. Zobov, R. Williamson, O. L. Polyansky and P. F. Bernath, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **30**, 735 (2001).
27. E. Jourdanneau, F. Chaussard, R. Saint-Loup, T. Gabard, and H. Berger, *J. Mol. Spectrosc.* **233**, 219 (2005).
28. E. Jourdanneau, T. Gabard, F. Chaussard, R. Saint-Loup, H. Berger, E. Bertseva, and F. Grisch, *J. Mol. Spectrosc.* **246**, 167 (2007).
29. B. Lavorel, G. Millot, R. Saint-Loup, H. Berger, L. Bonamy, J. Bonamy and D. Robert, *J. Chem. Phys.* **93**, 2176 (1990).
30. B. Lavorel, G. Millot, R. Saint-Loup, H. Berger, L. Bonamy, J. Bonamy and D. Robert, *J. Chem. Phys.* **93**, 2185 (1990).
31. D. Brueggemann, B. Wies, X. X. Zhang, T. Henze, and K.-F. Knoche, in: *Combustion Flow Diagnostics*, ed. by D. F. G. Durao, M. V. Heitor, J. H. Whitelaw and P. O. Witze (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1992), pp. 495.