

7. Штейнберг А. С., Улыбин В. Б., Долгов Э. И. и др. Эффект диспергирования в процессах линейного пиролиза и горения полимеров // Горение и взрыв: Материалы III Всесоюз. симп. по горению и взрыву.— М.: Наука, 1972.— С. 124.
8. Беломонна Н. М., Вахтангишвили Л. Б., Бабич С. А. и др. Ограниченно горючие полифенилхиноксалины // Первая Междунар. конф. по полимерам повышенной горючести: Тез. докл.— Алма-Ата, 1990.— Т. 2.— С. 46.

г. Москва

Поступила в редакцию 30/VII 1991,
после доработки — 11/III 1993

УДК 535.853

Б. Ф. Бояршинов, А. А. Волков, С. Ю. Федоров

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАРС-СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУР И КОНЦЕНТРАЦИЙ В ВОДОРОДОВОЗДУШНОМ ПЛАМЕНИ

Опираясь на преимущества, которые появляются при использовании чисто вращательных спектров водорода, создан сравнительно простой КАРС-спектрометр. С его помощью в струе и факеле водорода проведены одновременные измерения мгновенных значений температуры и концентрации горючего с высоким пространственным разрешением. Приводятся данные по пульсационной структуре течения.

При исследовании турбулентных течений, в том числе и с горением, необходима аппаратура с высоким временным и пространственным разрешением (порядка 1—100 нс и 0,1 мм). Этим требованиям отвечают оптические средства диагностики, основанные на использовании спектрометрии когерентного антистоксового рассеяния света (КАРС-спектрометрия). Физические принципы метода изложены в большом количестве работ (см. в [1]).

С помощью мощных импульсных лазерных пучков возбуждается излучение света в ограниченном объеме газа, энергетический и спектральный состав которого позволяет получить данные о концентрации выбранного компонента газовой смеси и о температуре, не внося возмущений в исследуемый объект. В работе [2] одновременно измерены температура и концентрация азота в турбулентном пропановоздушном пламени с разрешением 10 нс и 1 мм соответственно. Подобные данные позволяют проанализировать пульсационную структуру пламени, определить в опытах функции плотности вероятности, которые необходимы для построения различных теоретических моделей.

Использование азота в качестве определяемого вещества оправдано тем, что он присутствует во всех областях пламени в качестве пассивной примеси. Однако возбуждение и обработка КАРС-спектров азота с целью получения данных о мгновенной температуре предъявляет повышенные требования к излучающей и приемной аппаратуре. При изучении водородовоздушного пламени, а также при создании двигателей, работающих на водороде, может быть полезным измерение температуры и концентраций именно этого вещества. Заметные преимущества появляются при работе с вращательными спектрами водорода, которые состоят из серии изолированных линий сравнительно высокой интенсивности. Это удобно с точки зрения регистрации и обработки результатов измерений и в конечном счете приводит к упрощению аппаратуры, делает ее доступной для лаборатории не только спектрометрического профиля.

В настоящей работе описан сравнительно простой КАРС-спектрометр для одновременных измерений мгновенных температур и концентраций водорода. Он создан на базе серийно выпускаемого лазера ЛЖИ-501.

© Б. Ф. Бояршинов, А. А. Волков, С. Ю. Федоров, 1993.

Интенсивность сигнала когерентного антистоксова рассеяния света I_A зависит от большого количества факторов: интенсивности падающего лазерного излучения I_L с фиксированной частотой ω_L , интенсивности излучения перестраиваемого лазера I_s со стоксовой частотой ω_s , от концентрации определяемого вещества N , температуры T , от частоты комбинационных резонансов в молекулах вещества Ω , частоты ω_s , а также от особенностей оптической схемы и других параметров, которые в процессе измерений могут сохраняться и описываются некоторым коэффициентом A . Выражение для интенсивности сигнала можно записать в виде

$$I_A = AI_L^2 I_s N^2 F(\Omega, T),$$

причем от импульса к импульсу интенсивность излучения лазеров может изменяться в широких пределах, однако за время выборки их отношение сохраняется постоянным. Здесь четыре неизвестных величины I_L, I_s, N, T , поэтому для одновременного определения концентрации и температуры за один импульс излучения лазера (10 нс) необходимо измерить четыре сигнала КАРС. Два из них (I_{A1} и I_{A2}), соответствующие известным комбинационным частотам Ω_1 и Ω_2 , могут быть возбуждены в объеме водорода при известной его концентрации N_0 и температуре T_0 ; два других и для тех же частот — в объекте исследований, т. е. в месте фокусировки лазерных пучков в пламени, в котором N и T не известны:

$$\begin{aligned} I_{A1} &= A_1 I_L^2 I_{s1} N_0^2 F(\Omega_1, T_0), \\ I_{A2} &= A_2 I_L^2 I_{s2} N_0^2 F(\Omega_2, T_0), \\ I_{A3} &= A_3 I_L^2 I_{s1} N^2 F(\Omega_1, T), \\ I_{A4} &= A_4 I_L^2 I_{s2} N^2 F(\Omega_2, T). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь A_1, A_2, A_3, A_4 — постоянные коэффициенты, характеризующие эффективность оптической системы и системы регистрации. Они могут быть определены в процессе испытания КАРС-спектрометра. Система уравнений (1) замкнута и может быть использована для определения температуры T и концентрации N (молекул водорода) за один импульс излучения, когда отношение интенсивностей лазерного излучения остается постоянным. При этом частоты излучения перестраиваемого лазера (стоксовы частоты) подобраны так, чтобы выполнялись условия: $\Omega_1 = \omega_L - \omega_{s1}$ и $\Omega_2 = \omega_L - \omega_{s2}$. Световые сигналы КАРС отличаются от лазерного излучения по частотам; I_{A1}, I_{A3} имеют частоту $\omega_{A1} = \omega_L + \Omega_1$, а для I_{A2}, I_{A4} $\omega_{A2} = \omega_L + \Omega_2$, кроме того, они могут быть пространственно отделены от него.

Серия частот, соответствующая вращательным переходам в молекуле водорода, описывается выражением [3]: $\Omega_j = 4B(j+3/2)$, где $B = 60,8$ 1/см, $j = 0, 1, 2, 3, \dots$. Для возбуждения, например, первой и третьей линии при использовании опорного излучения 532 нм необходимо излучение на длинах волн $\lambda = 550$ нм (ω_{s1}) и 565 нм (ω_{s2}), которые соответствуют полосе усиления лазера на красителе родамин 6Ж, причем КАРС регистрируется при $\lambda = 515$ нм (ω_{A1}) и 503 нм (ω_{A2}).

Доработка лазера ЛЖИ-501 заключалась в замене зеркала в резонаторе на двойное с независимой юстировкой каждого, в использовании необработанной энергии излучения при $\lambda = 1064$ нм в каскадах усиления. На выходе излучающей части спектрометра имеются два параллельных пучка с $\lambda = 532$ нм с энергией $E \approx 20$ мДж/имп и два коллинеарных ($\lambda = 550$ и 565 нм) с $E \approx 3$ мДж/имп, которые последовательно фокусируются в контрольном и измерительном объемах по известной схеме BOXCARS. В качестве контрольного объема используется кювета, заполненная водородом при давлении 1 атм при комнатной температуре. Размер области пересечения пучков (пространственное разрешение спектрометра) составил $0,05 \times 0,05 \times 0,5$ мм. Приемная часть обеспечивает разделение в фокальной плоскости монохроматора УМ-2 четырех сигналов КАРС по частотам ω_{A1} и ω_{A2} , а также по признаку принадлежности

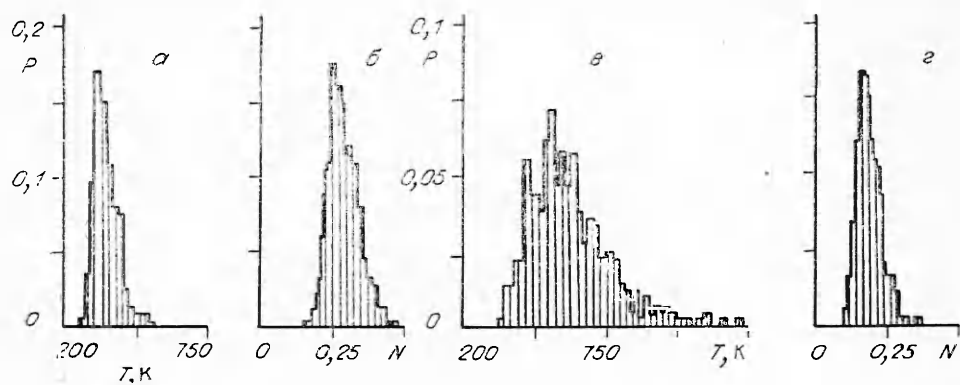


Рис. 1. Плотность вероятности температуры (а, в) и концентрации (б, г) в струе (а, б) и пламени (в, г); $x = 20$ (а, в, г) и 50 мм (б).

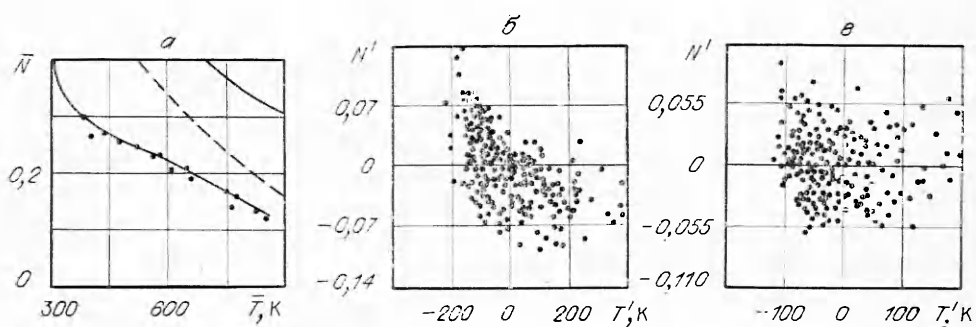


Рис. 2. Связь средних (а) и пульсационных значений температур и концентраций при горении (б, в); $x = 15$ (б) и 25 мм (в).

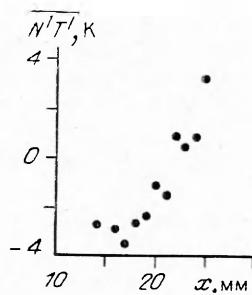


Рис. 3. Осредненная корреляция пульсаций температуры и концентрации в пламени.

к контрольному или измерительному объему. Эти сигналы по световодам передаются на четыре фотоэлектронных умножителя ФЭУ-87 и считываются системой выборки и хранения. Время выборки (0,1 нс) много меньше длительности сигнала КАРС. Электрические сигналы поступают на четырехканальный АЦП-10/30-1 и записываются в памяти ЭВМ с последующей их обработкой.

В экспериментах установлено, что квадратичная зависимость интенсивности КАРС-сигнала от концентрации водорода, как и в [2], сохраняется до $\sim 20-30\%$, а нижний предел чувствительности в моноимпульсных измерениях ($\sim 1\%$) значительно выше, чем уровень, при котором следует учитывать нерезонансный фон. Стандартное отклонение температуры при измерениях в кювете с водородом при комнатных условиях (~ 20 К), точность определения средних температур, согласно [2], лучше 2–5 %.

Опыты проведены при горении восходящей струи водорода, истекающего в воздух из сопла диаметром 2,5 мм. Число Рейнольдса по параметрам газа на выходе и диаметру сопла $Re = 4000$. На основании измерений на оси потока представляется возможным получить данные не

только о средних параметрах, но также о пульсационной структуре течения, о взаимных и пространственных корреляциях температуры и концентрации в зоне горючего. Плотность вероятности для температур и концентраций показаны на рис. 1. Величина интервалов 0,02 и 20 К, соответственно, обрабатывались результаты 500 измерений при одной и той же координате. Видно, что химические превращения существенно сказываются на распределении температур, плотность вероятности для концентрации практически не изменяется. Аналогичный результат получен в [2].

Представляют интерес данные, включающие обе измеряемые величины. На рис. 2 показана связь средних температур и концентраций, а также их пульсаций, которые получены при проведении моноимпульсных измерений на оси факела. Штриховой линией на рис. 2, а отмечены данные [4] для диффузионного водородного пламени. Сплошная линия — расчет по модели фронта пламени [5] для числа Льюиса — Семёнова $Le = 1$. Подобный подход использован в [2] для описания связи температуры и концентраций пассивной примеси (азота). В случае горения водорода расчет описывает данные [4] лишь при низких температурах.

Моноимпульсные измерения позволяют проанализировать корреляции пульсаций $K = N'T'$. Если $K = 0$, пульсации концентраций и температуры статистически независимы. Из рис. 3 видно, что с увеличением расстояния от среза сопла корреляция меняет знак и становится положительной. Возможно, что это связано с возрастанием количества отрицательных пульсаций концентрации в сочетании с отрицательными пульсациями температуры, которые имеют большую амплитуду. Это можно проследить из сравнения диаграмм рис. 2, б и рис. 2, в, где каждая точка представляет собой результат измерений за один импульс лазерного излучения длительностью 40 нс. Положительные значения корреляции определяются точками, расположенными в первой и третьей частях диаграммы. Видно, что их количество возрастает по мере удаления от сопла.

Таким образом, на основе преимуществ, которые появляются при работе с чисто вращательными спектрами антистоксова когерентного рассеяния, на молекулах водорода (изолированные линии высокой интенсивности) создан сравнительно простой КАРС-спектрометр высокого временного и пространственного разрешения. С его помощью могут быть получены качественно новые данные в опытах по одновременному измерению мгновенных температур и концентраций водорода, отражающие сложный процесс взаимодействия турбулентности и горения.

Представленный материал является одной из первых публикаций о таком варианте применения метода КАРС. Авторы надеются, что это может послужить оправданием снижения их требований к полноте анализа полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахманов С. А., Коротеев Н. И. Методы нелинейной оптики в спектроскопии рассеяния света. — М.: Наука, 1981.
2. Гросс Л. П., Свитцер С. В., Шрайбер Д. Д. Измерения температуры и концентрации в турбулентных пламенах методом спектроскопии когерентного антистоксова комбинационного рассеяния. // *Аэрокосм. техника*. — 1984. — 2, № 9. — С. 158—165.
3. *Laser Raman Gas Diagnostics*/Ed by M. Lapp, C. M. Penney. — N. Y.: Plenum Press, 1974. — 397 p.
4. Cheng T. S., Wehrmeyer J. A., Pitz R. W. Simultaneous temperature and multi-species measurement in a lifted hydrogen diffusion flame by KrF excimer laser // *AIAA Paper 94-0181*, Vanderbilt University, 1991. — 11 p.
5. Бояришинов Б. Ф., Волчков Э. П., Терехов В. И. и др. Турбулентный пограничный слой со вдувом реагирующих веществ // *ФГВ*. — 1981. — 17, № 6. — С. 21—28.

г. Новосибирск

Поступила в редакцию 24/VIII 1992 г.
после доработки — 29/I 1993