

03;09;15.1

Измерения флуктуаций температуры в турбулентном пламени методом когерентного антистоксова рассеяния света

© В.Д. Кобцев, Д.Н. Козлов, С.А. Кострица,
В.В. Смирнов, О.М. Стельмах

Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва
E-mail: dnk@kapella.gpi.ru

Поступило в Редакцию 8 декабря 2014 г.

С помощью лазерного комплекса когерентного антистоксова рассеяния света, с наносекундной длительностью импульсов лазеров накачки и широким безмодовым спектром стоксова излучения, при турбулентном диффузионном горении парогазовой смеси декан–воздух в пламени лабораторной горелки измерены локальные температуры и амплитуды их флуктуаций во времени, обусловленных нестабильностью состава реагирующей среды и нестационарностью процесса горения. Относительная погрешность термометрии азотсодержащих смесей в диапазоне 100–2000 К за время одного лазерного импульса (10 ns) составляла 3.1%.

Спектроскопия когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) позволяет определять температуру и состав газовых смесей с высоким временным и пространственным разрешением за один лазерный импульс и с определенной периодичностью. Некоторые примеры недавних практических применений метода КАРС при использовании лазеров накачки наносекундной длительности и с широким спектром излучения, а также ссылки на работы, в которых описаны достоинства, особенности и способы реализации этого метода, содержатся в [1,2] и обзоре [3].

В реальных турбулентных пламенах разброс найденных значений температур от импульса к импульсу определяется не только погрешностью измерения, но и амплитудой флуктуаций температуры в точке измерения. Информация о реальных величинах этих флуктуаций представляет несомненный интерес для разработчиков камер сгорания и газодинамических трактов перспективных авиационных и ракетных

двигателей. Поэтому вопрос о величине и характере погрешностей определения температуры особенно важен для термометрии турбулентного горения.

В данной работе проведен экспериментальный анализ случайной и систематической погрешностей определения за один лазерный импульс локальной температуры стационарной азотсодержащей газовой среды по КАРС-спектрам молекул N_2 с применением созданного нами лабораторного измерительного комплекса на основе двух импульсно-периодических наносекундных лазеров накачки, один из которых — источник стока излучения — имеет широкий и практически безмодовый спектр. В турбулентном диффузионном пламени смеси декан-воздух в лабораторной горелке выполнены измерения флуктуаций локальной температуры.

Измерительный комплекс КАРС включал в себя: импульсно-периодический $Nd^{3+} : YAG$ -лазер с кристаллом для генерации второй гармоники (LS-2137/2, Lotis ТП, 10 Hz, ~ 10 ns, 532 nm); накачиваемый им безмодовый широкополосный лазер на красителе [1] (ООО „Кластер“, 607 nm, ширина спектра ~ 200 cm^{-1}); систему зеркал и линз; спектрограф (ООО „Кластер“, решетка 1200 lines/mm, фокусное расстояние 1 m), оснащенный стробируемым оптическим многоканальным анализатором с усилителем яркости (PI-MAX, Princeton Instruments); генератор задержанных импульсов синхронизации; персональный компьютер. Энергия импульсов излучений накачки составляла 20 mJ (532 nm) и 10 mJ (607 nm). Когерентное рассеянное излучение (473 nm) из зондируемого объема доставлялось к спектрографу и вводилось в него многомодовым оптическим волокном с числовой апертурой 0.2. Многоканальный анализатор, синхронизованный с импульсом $Nd^{3+} : YAG$ -лазера, регистрировал спектр КАРС в каждом лазерном импульсе за время его длительности. Высокое пространственное разрешение измерений, позволяющее уменьшить их систематическую погрешность, определялось размерами объема взаимодействия разнесенных в пространстве и скрещивающихся по схеме планарного BOXCARS [4] лазерных пучков накачки в области их фокусировки. При использовании линзы с фокусным расстоянием $f = 200$ mm эти размеры составляли $0.025 \times 0.025 \times 2$ mm.

Спектральное распределение интенсивности излучения широкополосного лазера на красителе искажает истинную форму регистрируемых резонансных КАРС-спектров молекул N_2 . Для устранения этого искажения каждый из спектров нормировался на спектральное распределение

интенсивности нерезонансного излучения КАРС. Это излучение генерировалось в кислороде при давлении 0.5 МПа и температуре 296 К, а его спектр регистрировался в режиме накопления 100 последовательных сигналов.

Определение температуры газа из колебательно-вращательных КАРС-спектров молекул N_2 производилось с помощью программы, позволяющей создавать библиотеку расчетных спектров при различных температурах и давлениях газа и находить температуру из каждого экспериментального спектра по критерию его наилучшего совпадения по форме с одним из расчетных спектров. При этом отбрасывались те экспериментальные спектры, интенсивность которых (в силу нелинейного характера процесса КАРС и флуктуаций плотности и состава среды) оказывалась слишком большой или слишком малой.

Оценка точности определения температуры газовой среды с применением измерительного комплекса проводилась путем сравнения значений температуры, полученных в термостабилизированной нагреваемой газовой кювете высокого давления как из КАРС-спектров молекул N_2 , так и с помощью термопары хромель–алюмель, оттарированной в термостате при температурах до 1400 К и расположенной на расстоянии ~ 1 мм от точки КАРС-зондирования. При этом в качестве истинной выбиралась температура T_t , измеряемая термопарой.

Перед измерениями температура кюветы, заполненной азотом высокой чистоты при давлении 0.2 МПа, стабилизировалась в течение часа на некотором значении вблизи 1250 К. Затем в течение 5 с с частотой повторения 10 Hz регистрировалась серия из 50 КАРС-спектров молекул N_2 . Значения температуры T , получаемые „мгновенно“, т. е. в каждом импульсе, могут усредняться по выбранному количеству последовательных импульсов N_{acc} , чем определяется эффективное время измерения $t_{eff} = N_{acc} \times (0.1 \text{ s})$. Точность определения температуры зависит от выбранной величины t_{eff} . Случайная погрешность измерений характеризуется среднеквадратичным отклонением σ результата измерения температуры за один импульс от величины T_{av} , усредненной по ансамблю найденных величин. Величины T_{av} и σ определяются путем аппроксимации частотного распределения полученных в серии измерений значений температур функцией нормального распределения и расчета параметров этой аппроксимации. Систематическую погрешность измерений определим как разность $(T_{av} - T_t)$.

На рис. 1, а в качестве примера представлены значения температур газа, найденных для каждого из 50 КАРС-спектров, последовательно за-

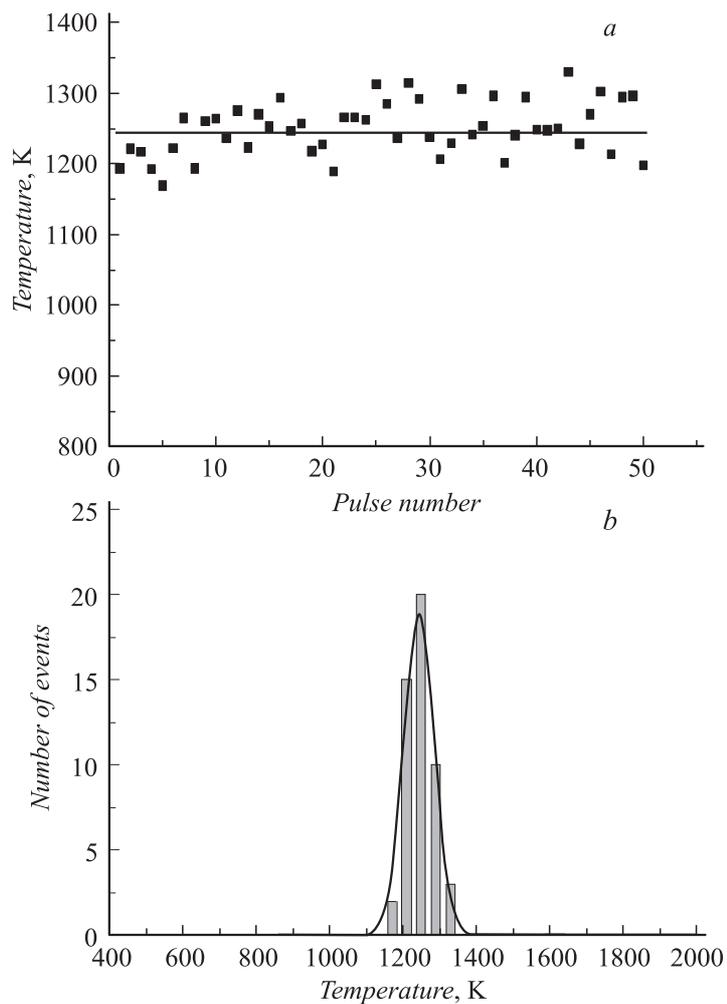


Рис. 1. Разброс значений температур, определенных в термостабилизированной кювете: *a* — значения температур, найденных в каждом из 50 последовательных лазерных импульсов; сплошная линия отвечает средней температуре; *b* — частотное распределение значений температур при измерениях за один импульс; сплошной линией показана аппроксимация величин функцией нормального распределения; *c* — значения найденных температур при усреднении по 10 последовательным импульсам.

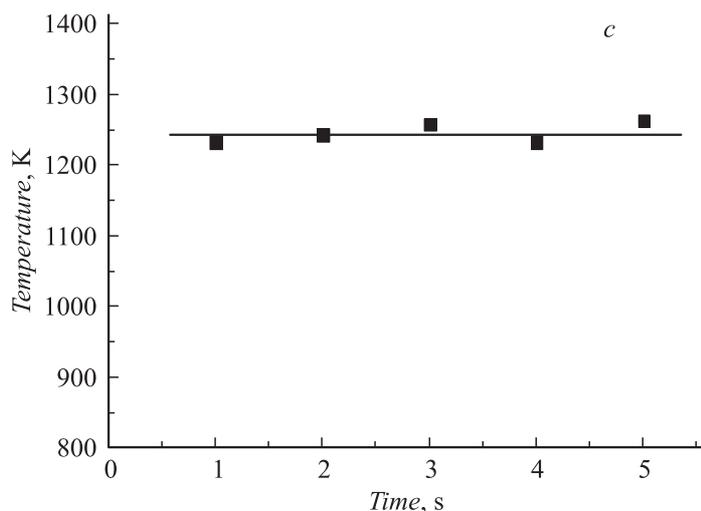


Рис. 1 (продолжение).

регистрованных в термостабилизированной кювете при $T_t = 1246$ К. Гистограмма на рис. 1, *b* представляет собой частотное распределение этих значений, аппроксимация которого нормальным распределением позволяет найти величины $T_{av} = 1244$ К и $\sigma = 39$ К и охарактеризовать относительную случайную погрешность определения температуры за один лазерный импульс величиной $\delta T = (\sigma/T_{av}) \cdot 100 = 3.1\%$. Систематическая погрешность составляет при этом всего $(T_{av} - T_t) = -2$ К, а ее относительная величина равна $\Delta T = (|T_{av} - T_t|/T_{av}) \cdot 100 \approx 0.2\%$. На рис. 1, *c* приведены значения температур, усредненных по $N_{acc} = 10$ измерениям. В этом случае при сохранении величин $T_{av} = 1244$ К и соответственно систематической погрешности относительная случайная погрешность δT уменьшается до $\sim 1.0\%$.

Измерительный комплекс КАРС с указанными характеристиками точности термометрии азотсодержащих газовых смесей при стационарных условиях был использован для определения локальных средних и „мгновенных“ температур газа при турбулентном диффузионном горении смеси декан–воздух в лабораторной горелке при давлении 0.1 МПа. Характерный экспериментальный КАРС-спектр молекул N_2 , полученный за один лазерный импульс вблизи помещенной в пламя

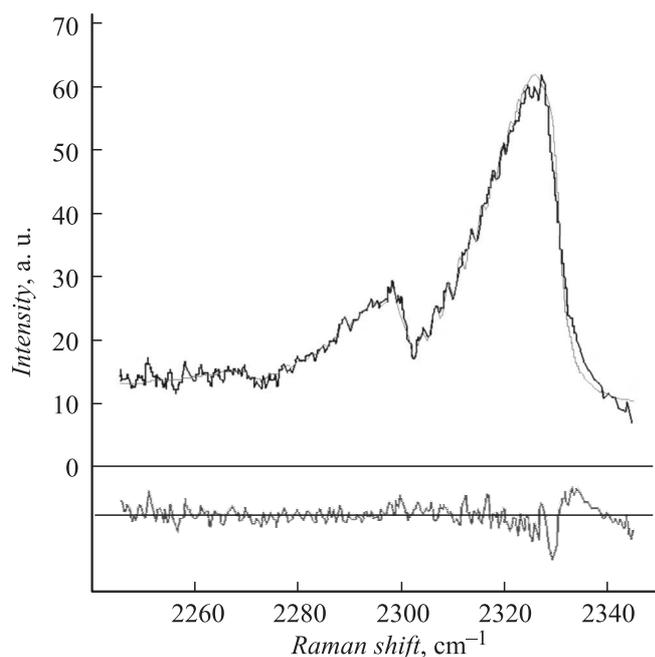


Рис. 2. Вид экспериментального и расчетного (более тонкая линия) КАРС-спектров молекул N_2 при температуре 1766 К. Смещенный относительно нуля нижний трек показывает спектр значений разности амплитуд экспериментального и расчетного спектров, характеризующий качество процедуры подгонки.

контрольной термопары, а также наиболее близкий к нему расчетный спектр приведены на рис. 2. Гистограмма частотного распределения значений температур, полученных в серии из 200 последовательных импульсов, представлена на рис. 3, а. При средней найденной из спектров температуре $T_{av} = 1866$ К относительная величина среднеквадратичного отклонения полученных „мгновенных“ значений температуры составила в этих измерениях в турбулентной среде 9.0% ($\sigma = 168$ К), что значительно больше случайной погрешности измерения за один лазерный импульс в кювете (3.1%). Измерения с помощью контрольной термопары дали $T_t = 1825$ К, что соответствует разности

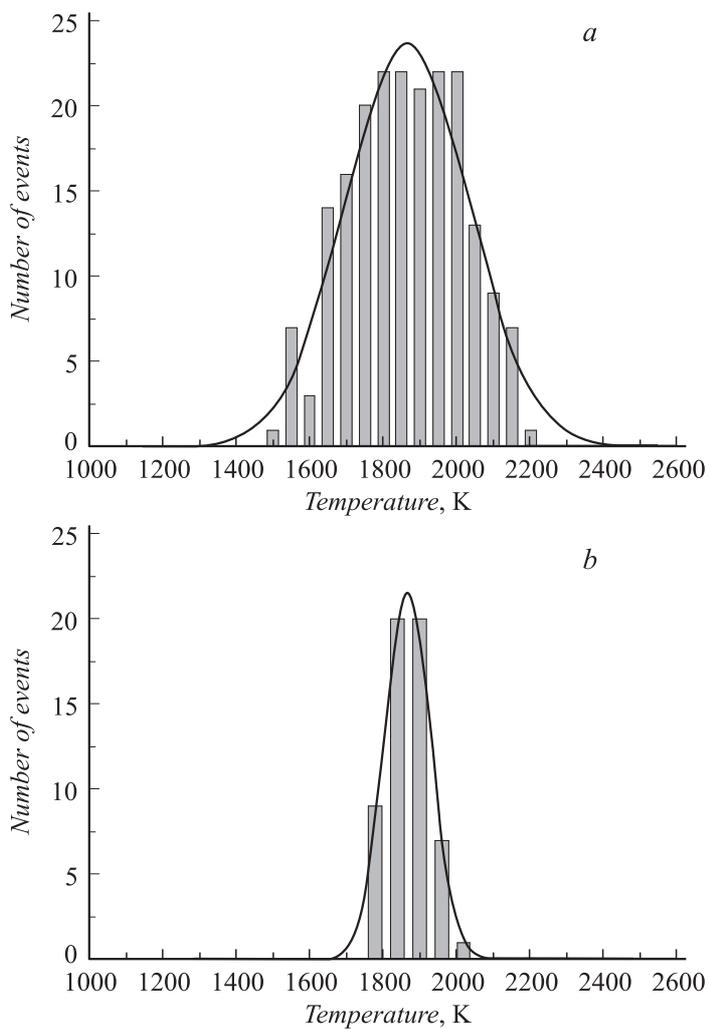


Рис. 3. Частотные распределения значений температур, полученных в серии последовательных импульсов; сплошной линией показана аппроксимация функцией нормального распределения: *a* — при измерениях за один импульс в серии из 200 импульсов; *b* — при усреднении по 10 импульсам в серии из 600 импульсов.

$(T_{av}-T_t) = +41$ К, т. е. в относительных единицах 2.2%. Результат усреднения значений температуры в серии из 600 импульсов по $N_{acc} = 10$ измерениям ($T_{av} = 1827$ К, $\sigma = 60$ К) представлен на рис. 3, *b*. Видно, что при увеличении t_{eff} до 1 с, что сравнимо с постоянной времени измерения термопарой, величина разброса температур уменьшается с 9.0 до 3.3%. Заметно уменьшается при этом и величина разности $(T_{av}-T_t)$.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что при относительной случайной погрешности локальных измерений за один лазерный импульс в $\delta T = 3.1\%$ среднеквадратичное отклонение найденных значений температур в горелке в 9.0% характеризует реальный разброс „мгновенных“ температур, который обусловлен турбулентностью газового потока и кратковременными флуктуациями стехиометрии смеси в зондируемом объеме на масштабе времени 0.1 с.

С помощью КАРС-спектроскопии проведено измерение температур и амплитуд их флуктуаций во времени с высоким пространственным разрешением в различных точках турбулентного пламени смеси декан–воздух в лабораторной горелке. Проведены оценки возможных и достигнутых точностей измерений „мгновенных“ и усредненных значений температур.

Авторы выражают признательность В.И. Фабелинскому за конструктивное и заинтересованное обсуждение результатов работы.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований президиума РАН № 46П и РФФИ, проект № 14-08-0075-а.

Список литературы

- [1] *Fabelinsky V.I., Smirnov V.V., Stel'makh O.M., Vereschagin K.A., Clauss W., Manfletti C., Sender J., Oswald M.* // J. Raman Spectrosc. 2010. V. 41. N 8. P. 890–896.
- [2] *Верещагин К.А., Смирнов В.В., Стельмах О.М., Фабелинский В.И.* // Квантовая электроника. 2012. Т. 42. № 1. С. 44–50.
- [3] *Kiefer J., Ewart P.* // Progr. Energy and Comb. Sci. 2011. V. 37. N 5. P. 525–564.
- [4] *Eckbreth A.C.* // Appl. Phys. Letts. 1978. V. 32. N 7. P. 421–423.