

*Четырнадцатая Международная научно-техническая конференция
«Оптические методы исследования потоков»
Москва, 26 – 30 июня 2017 г.*

УДК 535.8; 535.34; 536.462; 536.5

В.Д. Кобцев^{1,2}, С.А. Кострица^{1,2}, Ю.А. Курицын³, В.В. Лигер³, В.Р. Мироненко³

¹ *Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Россия,
111116, Москва, Авиамоторная ул., 2, e-mail: kobtsev.vitaly@gmail.com*

² *Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, Россия,
119991, Москва, ул. Вавилова, 38, e-mail: kobtsev.vitaly@gmail.com*

³ *Институт спектроскопии Российской академии наук, Россия,
108840, Москва, Троицк, Физическая ул., 5, e-mail: liger@isan.troitsk.ru*

**ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ТОЧНОСТИ ЛАЗЕРНО-АБСОРБЦИОННОГО ТЕРМОМЕТРА
ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В ОБЛАСТИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕКТРОСКОПИИ КОГЕРЕНТНОГО АНТИСТОКСОВА
РАССЕЯНИЯ СВЕТА**

АННОТАЦИЯ

Экспериментально проверена точность измерений температур квазиоднородно-нагретых газов в диапазоне 1500-2100 К с использованием разработанного трассового термометра реагирующих газовых потоков на основе диодной лазерной абсорбционной спектроскопии (ДЛАС) молекул H₂O. Тестовым объектом служило ламинарное метаново-воздушное пламя щелевой горелки с частичным предварительным смешиванием компонентов горючей смеси, обеспечивающее высокую однородность распределения температуры в направлении вдоль щели. Значения средних температур, полученные с помощью ДЛАС при трассовых измерениях в этом направлении в различных частях пламени, сравниваются с результатами локальных измерений температуры вдоль этой трассы, выполненных с использованием спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). Абсолютные значения и профили распределения температур, полученные методом ДЛАС, удовлетворительно согласуются с результатами КАРС-измерений, а различия при температурах ~ 1500-2100 К не превышают 10%.

**БЕСКОНТАКТНАЯ ТЕРМОМЕТРИЯ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ, ПОГЛОЩЕНИЕ,
ДИОДНАЯ ЛАЗЕРНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ, КОМБИНАЦИОННОЕ РАССЕЯНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ

Различные модификации диодной лазерной абсорбционной спектроскопии (ДЛАС) с использованием перестраиваемых лазеров уже более 20 лет успешно применяются для измерений температуры газовых сред вплоть до ~ 2000 К как в лабораторных установках, так и на полномасштабных испытательных стендах[1-3]. Традиционно, этот метод используется для трассовых измерений средней температуры вдоль лазерного пучка и является наиболее пригодным для квазиоднородно-прогретых сред, с малыми продольными и поперечными градиентами температуры внутри пучка. При этом наиболее часто измеряется прямое поглощение лазерного излучения пробными молекулами на двух длинах волн.

Системы ДЛАС характеризуются относительной простотой устройства и управления, высокой чувствительностью, скоростью и частотой повторений измерений, прочной и устойчивой конструкцией, и, наконец, сравнительно низкой стоимостью. Эти факторы определяют привлекательность их применения для бесконтактной термометрии газовых сред в промышленных установках, использующих процессы горения топлива и/или потоки нагретых газов [4-6].

Оценка точности термометров ДЛАС в диапазоне температур до ~ 1500 К может производиться с помощью термопар. В задачах измерения более высоких температур, при которых термопары неприменимы, встает проблема тестирования используемой системы ДЛАС и определения практически реализуемой точности термометрии.

Целью данной работы является характеристика точности измерений температур квазиоднородно-нагретых сред в диапазоне 1500–2100 К с применением разработанной системы диодной лазерно-абсорбционной термометрии реагирующих газовых потоков. Примером подходящего и практически интересного объекта измерений может служить поток в модельной камере сгорания прямоточной силовой установки, работающей на углеводородном топливе [6]. В качестве тестового объекта для апробации созданного ДЛАС-термометра использовалось ламинарное метаново-воздушное пламя щелевой горелки [7] с частичным предварительным смешиванием компонентов горючей смеси. Значения средних температур, полученные с помощью ДЛАС при трассовых измерениях в направлении щели в различных частях пламени, сравнивались с результатами локальных измерений температуры вдоль трассы с применением нелинейной спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) [8] – широко признанного, хотя и экспериментально сложного, метода бесконтактных невозмущающих измерений температуры и состава газовых смесей.

МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Диодная лазерная абсорбционная термометрия газа

Определение температуры с помощью рассматриваемого ДЛАС-термометра основано на измерении поглощения лазерного излучения молекулами H_2O . Результатом измерения является усредненная температура газа вдоль направления распространения лазерного луча. Сила отдельной спектральной линии поглощения молекулы при определенной температуре зависит от энергии нижнего квантового состояния, с которого происходит переход. В предположении термодинамического равновесия вращательной, колебательной и поступательной энергетических подсистем молекулы отношение сил двух линий поглощения с различными энергиями нижнего состояния является функцией только температуры [6]. Силы отдельных спектральных линий поглощения молекул H_2O при нормальной температуре известны с хорошей точностью и приведены в базах данных HITRAN [9], NITEMP [10] и др. Таким образом, регистрация спектров поглощения в квазиоднородно-нагретой среде и определение из них отношения интегральных интенсивностей известных линий позволяет определить температуру газа.

Работа ДЛАС-системы основана на регистрации вращательной структуры колебательно-вращательных спектров поглощения молекул H_2O – продуктов сгорания топлива – на длинах волн вблизи 1.34 мкм и 1.39 мкм, соответствующих переходам полосы первого обертона или составного валентного колебания молекулы H_2O (с частотами, соответственно, 7444 см^{-1} и 7185 см^{-1}). Для того чтобы последовательно, но практически одновременно, регистрировать отстоящие по частоте на величину около 260 см^{-1} друг от друга линии поглощения молекул H_2O , обеспечивая хорошую чувствительность определения температуры, в системе используются два одночастотных диодных InGaAsP-лазера с распределенной обратной связью. Частота излучения лазеров зависит от температуры p - n перехода, а ширина линии составляет менее $3 \cdot 10^{-4}\text{ см}^{-1}$. Характерная ширина линий поглощения молекул H_2O в условиях экспериментов составляет $\approx 0.01\text{ см}^{-1}$, что существенно

превышает ширину лазерной линии. Таким образом, при обработке полученных сигналов излучение лазеров можно считать монохроматическим. Линейная во времени перестройка частоты лазерного излучения в диапазоне $2\text{-}3\text{ см}^{-1}$ импульсом тока накачки происходит за характерные времена ~ 20 мс. При этом спектры поглощения регистрируются с частотой 25 Гц.

Излучение диодных лазеров с диаметром пучка ~ 1 мм проходит через диагностируемый объем и попадает на быстродействующее приемное устройство на основе InGaAs-фотодиода. В процессе перестройки частоты лазерного излучения по контуру спектральной линии поглощения интенсивность света, попадающего на фотодиод, уменьшается. Временной профиль сигнала, зарегистрированного фотодиодом, соответствует спектру поглощения среды, через которую проходит лазерный луч, в диапазоне перестройки частоты диодного лазера. Это позволяет определить интегральные интенсивности отдельных спектральных линий и, следовательно, температуру.

Подробное описание принципа работы системы и особенностей ее технической реализации, а также процедуры обработки полученных спектров приведены в работе [6].

Метаново-воздушная горелка

Схема щелевой горелки Вольфхарда-Паркера [7], в ламинарном метаново-воздушном пламени которой проводились совместные температурные измерения методами ДЛАС и КАРС, приведена на рис. 1а. В экспериментах использовалось частичное предварительное смешивание топлива и окислителя, обеспечивающее обогащенную рабочую смесь. Корпус горелки разделен на три прямоугольных канала с отдельной подачей газов. Каналы заполнены стеклянными шариками диаметром 1 мм для гомогенизации потоков и достижения хорошей степени перемешивания топлива и окислителя в центральном канале. В центральную часть подавались метан и воздух, а в боковые каналы – дополнительное количество воздуха, который формировал спутный поток вокруг пламени и способствовал его стабилизации. Таким способом обеспечивался квазистационарный поток нагретого газа. Конструкция горелки предполагает симметрию пламени относительно плоскости YZ и близкое к однородному распределение температуры вдоль щели горелки (вдоль оси Y). При этом наибольшие изменения температуры ожидаются вдоль оси X .

Фотографии пламени при горении обогащенной смеси с коэффициентом избытка топлива $\Phi = 2$ приведены на рис. 1б (в направлении оси Y) и рис. 1в (в направлении оси X). Отчетливо видны границы внутреннего и внешнего фронтов пламени. В частности, высота внутреннего фронта составляет ≈ 20 мм.

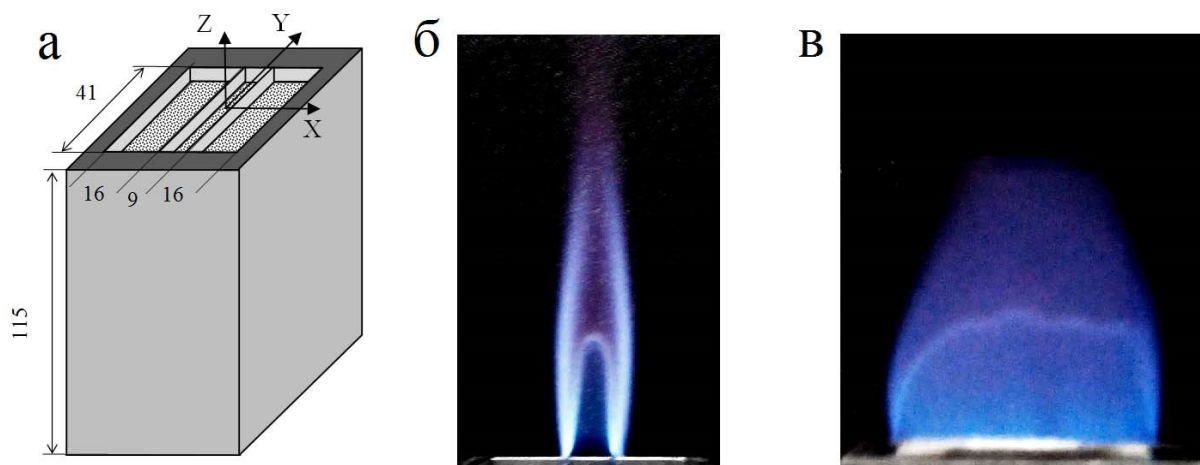


Рис. 1. Схема метаново-воздушной горелки с предварительным смешиванием компонентов горючей смеси, с указанием системы координат (а), и фотографии пламени в направлении осей Y (б) и X (в).

Использование в трактах подачи газов электронных измерителей протока Bronkhorst F111 позволило устанавливать расходы горючего и окислителя с точностью 0.01 норм. л/мин (при общем расходе смеси 5.9 норм. л/мин), а расходы воздуха в спутном потоке – с точностью 0.1 норм. л/мин (при общем расходе 23.6 норм. л/мин), и добиваться высокой воспроизводимости характеристик пламени от запуска к запуску. Горелка была установлена на подвижном основании, которое позволяло позиционировать ее корпус с точностью 0.01 мм – по оси X , 0.25 мм – по оси Z и 1 мм – по оси Y .

Термометрия газа с использованием когерентного антистоксова рассеяния света

Значения локальных температур в пламени на трассах термометрии с использованием ДЛАС-термометра определялись из спектров когерентного антистоксова рассеяния света комбинационно-активными пробными молекулами в газовой смеси. В данной работе в качестве пробных использовались молекулы H_2 , образующиеся в углеводородном пламени в результате пиролиза топлива в обогащенной смеси.

В принципе, температура определяется из интенсивностей отдельных колебательно-вращательных компонент КАРС-спектра пробных молекул. Эти интенсивности сопоставляются населенностям вращательных уровней основного колебательного состояния молекул, которые подчиняются распределению Больцмана с температурой, соответствующей вращательной, а в предположении о термодинамическом равновесии поступательной и внутренних степеней свободы этих молекул, - и поступательной температуре [8]. Алгоритм определения температуры газа в пламени при атмосферном давлении с использованием колебательно-вращательных КАРС-спектров молекул H_2 описан в [11].

Используемый в данной работе КАРС-спектрометр, схема и элементный состав которого детально представлены в [12], был перенастроен для регистрации спектров H_2 и позволял получать их за одну лазерную вспышку длительностью ~ 10 нс с частотой 5 Гц. Конфигурация скрещивающихся сфокусированных лазерных пучков накачки задавала область, из которой регистрировался КАРС-спектр. Размеры этой области определяли пространственное разрешение метода при локальном измерении температуры. В нашем случае диаметр области зондирования составлял ~ 0.05 мм, а длина – ~ 2 мм. Спектры, зарегистрированные с накоплением 200 лазерных импульсов, обрабатывались с использованием программы, осуществляющей расчет интенсивностей отдельных компонент КАРС-спектров молекул H_2 и вычисление температуры газа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Термометрия пламени с использованием ДЛАС и КАРС проводилась на различных высотах ($Z = 5, 12, 22$ мм) над верхним краем корпуса горелки. При этом пучок диодного лазера пропускаться вдоль оси Y , вдоль нее же была направлена оптическая ось лазерных пучков накачки процесса КАРС, сфокусированных на оси пучка диодного лазера в плоскости XZ . Для того, чтобы убедиться в однородности распределения температуры вдоль оси Y , температуры в пламени были промерены вдоль этой оси, при нескольких значениях Z и X , с помощью термопары B -типа со спаем диаметром 0.9 мм. Хотя абсолютные значения температур, измеренные термопарой, оказались существенно ниже, чем определенные впоследствии из спектров КАРС (по-видимому, за счет интенсивного теплоотвода по проводам термопары и теплового излучения нагретого спа), показания термопары вдоль оси Y продемонстрировали однородность распределения температуры в этом направлении. Таким образом, большая часть оптического пути пучка диодного лазера внутри пламени находилась в однородно-прогретой области. Это позволило считать результаты измерений методом ДЛАС усредненной вдоль оси Y температуры корректными и отвечающими температуре газа в точке (X,Z) , а также сравнивать их с результатами локальной КАРС-термометрии пламени в плоскости XZ .

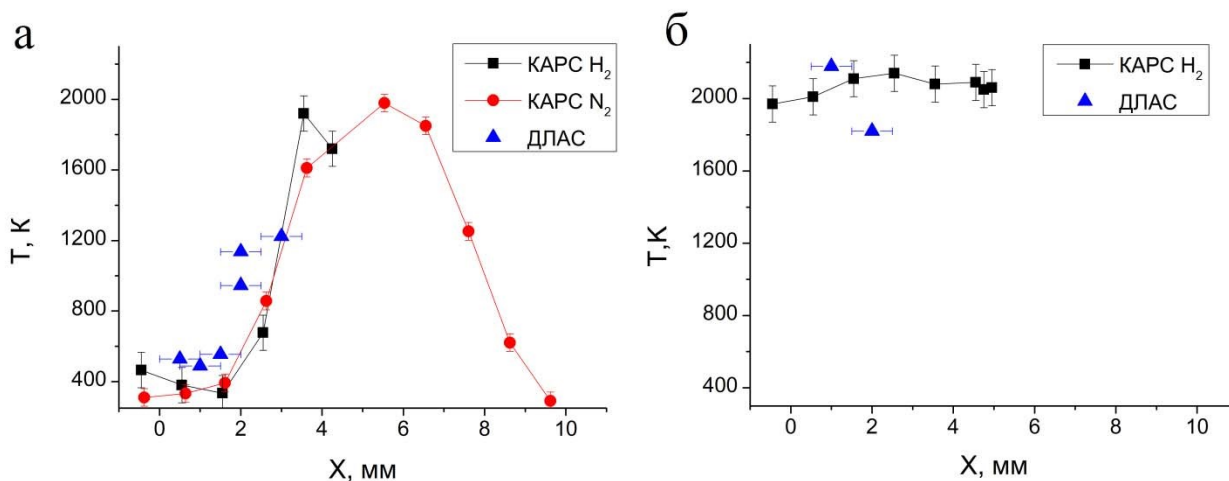


Рис. 2. Измерения температуры вдоль оси X : а) на высоте $Z = 5$ мм, б) на высоте $Z = 22$ мм.

На рис. 2 в качестве примера представлены распределения температуры в пламени горелки вдоль оси X с одной стороны от плоскости симметрии YZ , найденные из спектров КАРС молекул H_2 , а также температурные значения, полученные из ДЛАС-измерений, для высот $Z = 5$ мм и 22 мм при горении смеси с коэффициентом избытка топлива $\Phi = 2$. На рис. 2а приведены также, для сравнения, температуры, полученные в [13] в идентичной по конструкции горелке и при тех же параметрах потоков из КАРС-спектров молекул N_2 , которые содержатся в используемом воздухе. Значения температур, полученные с помощью ДЛАС-термометра, находятся в хорошем согласии с данными КАРС-спектроскопии в диапазоне температур газа 500-1200 К ($Z = 5$ мм) и повторяют характерный температурный профиль потока, отвечающий фронту пламени при $X \approx 5.5$ мм и области холодной горючей смеси в центральной части пламени при $X = 0-2$ мм. То же можно сказать о результатах измерений при $Z = 12$ мм в диапазоне 800-1500 К.

На рис. 2б приведены данные, полученные с использованием методов ДЛАС и КАРС в области верхней части пламени, где происходит выполаживание профиля температуры в потоке вдоль оси X , а её значение достигает 2100 К. В этом случае данные ДЛАС-термометрии также показывают согласие, в пределах 10%, с результатами измерений с помощью КАРС. Это говорит о пригодности разработанного ДЛАС-термометра для проведения измерений в диапазоне температур до 2100 К в квази-однородно прогретом потоке газа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные с использованием разработанной системы ДЛАС-термометрии абсолютные значения и профили пространственного распределения средних вдоль трассы измерения значений температур в метаново-воздушном пламени щелевой горелки – вплоть до температур ~ 2100 К – удовлетворительно согласуются с результатами локальных измерений с помощью КАРС-спектроскопии таких различных пробных молекул как H_2 и N_2 . При этом отклонения от данных КАРС-термометрии при наиболее высоких температурах не превышают 10%. Таким образом, разработанный ДЛАС-термометр можно применять для измерения средней температуры вдоль лазерного пучка, а также динамики ее изменения в квазиоднородно-прогретых газовых средах в диапазоне до 2100 К.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда приоритетных научных исследований ЦИАМ (Проект "Исследование и сравнительный анализ оптических методов измерения температуры газовых потоков с использованием спектроскопии когерентного

антистоксова рассеяния света и пирометра спектрального отношения"), Президиума РАН (Программа фундаментальных исследований № 46П) и Программы фундаментальных исследований Отделения физических наук "Фундаментальные проблемы лазерных технологий" (Проект "Разработка метода бесконтактной диагностики параметров горячих зон смешивающихся сверхзвуковых потоков газов на базе абсорбционной спектроскопии с диодными лазерами").

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

X, Y, Z – координаты точек измерения температуры,
 Φ – коэффициент избытка топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Allen M.G., Furlong E.R., Hanson R.K.** Tunable diode laser sensing and combustion control. In: Applied Combustion Diagnostics / Eds. K. Kohse-Höinghaus and J.B. Jeffries. Combustion: An International Series. NY, London: Taylor & Francis, 2002. Pp. 479-498.
2. **Большов М.А., Курицын Ю.А., Леонов С.Б., Лигер В.В., Мироненко В.Р., Савелкин К.В., Яранцев Д.А.** Измерение температуры и концентрации паров воды в сверхзвуковой камере сгорания методом абсорбционной спектроскопии // ТВТ. 2010. Т. 48. Доп. вып. С. 9-22.
3. **Ehn A., Zhu J., Li X., and Kiefer J.** Advanced laser-based techniques for gas-phase diagnostics in combustion and aerospace engineering // Appl. Spectrosc. 2017. V. 71 (5). P. 1-26.
4. **Goldenstein C., Schultz I., Spearrin R., Jeffries J., Hanson R.** Scanned-wavelength-modulation spectroscopy near 2.5 μm for H_2O and temperature in a hydrocarbon-fueled scramjet combustor // Appl. Phys. B. 2014. V. 116 (3). P. 717-727.
5. **Большов М.А., Курицын Ю.А., Лигер В.В., Мироненко В.Р., Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я., Леонов С.Б., Яранцев Д.А.** Измерение параметров нестационарных газовых потоков методом диодной лазерной абсорбционной спектроскопии // Квантовая электроника. 2015. Т. 45 (4). С. 377-384.
6. **Лигер В.В., Курицын Ю.А., Мироненко В.Р., Большов М.А., Понуровский Я.Я., Колесников О.М.** Измерение параметров нестационарных газовых потоков методом диодной лазерной абсорбционной спектроскопии в условиях высоких температур и давлений // ТВТ. 2017. Т. 55 (5).
7. **Smyth K.C., Miller J.H., Dorfman R.C., Mallard W.G., Santoro R.J.** Soot inception in a methane/air diffusion flame as characterized by detailed species profiles // Combust. Flame. 1985. V. 62. P. 157-181.
8. **Eckbreth A.C.** Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species. 2nd ed. N.Y.: CRC, 1996. P. 281-286.
9. **Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F. et al.** The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2013. V. 130. P. 4-50.
10. **Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J., Dothe H., Gamache R.R., Goldman A. et al.** HITRAN, the high-temperature molecular spectroscopic database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. 2010. V. 111. P. 2139-2150.
11. **Clauss W., Fabelinsky V.I., Kozlov D.N., Smirnov V.V., Stel'makh O.M., and Vereschagin K.A.** Dual-broadband CARS temperature measurements in hydrogen-oxygen atmospheric pressure flame // Appl. Phys. B. 2000. V. 70 (1). P. 127-131.
12. **Smirnov V.V., Kostritsa S.A., Kobtsev V.D., Titova N.S., Starik A.M.** Experimental study of combustion of composite fuel comprising n -decane and aluminum nanoparticles // Combust. Flame. 2015. V. 162 (10). P. 3554-3561.

13. **Datta A., Beyrau F., Seeger T., and Leipertz A.** Temperature and CO concentration measurements in a partially premixed CH₄/air coflowing jet flame using coherent anti-stokes Raman scattering // *Combust. Sci. and Techn.* 2004. V. 176. P. 1-20.

V.D. Kobtsev ^{1,2}, S.A. Kostritsa ^{1,2}, Yu.A. Kuritsyn ³, V.V. Liger ³, V.R. Mironenko ³

¹ *P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motors, Russia,*

111116, Moscow, Aviamotornaya st., 2, e-mail: kobtsev.vitaly@gmail.com

² *A.M. Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences, Russia,*

119991, Moscow, Vavilov st., 38, e-mail: kobtsev.vitaly@gmail.com

³ *Spectroscopy Institute, Russian Academy of Sciences, Russia,*

108840, Moscow, Troitsk, Fizicheskaya st., 5, e-mail: liger@isan.troitsk.ru

CHARACTERIZATION OF THE ACCURACY OF LASER ABSORPTION THERMOMETER OF GASEOUS FLOWS AT HIGH TEMPERATURES USING COHERENT ANTI-STOKES RAMAN SCATTERING SPECTROSCOPY

The accuracy of quasi-homogeneously heated gas temperature measurements in the range of 1500-2100 K using the developed line-of-sight gas flow thermometer, based on diode laser absorption spectroscopy (DLAS) of H₂O molecules, has been experimentally verified. As a test object, a laminar partially-premixed methane-air flame of a slot burner has been employed, which was providing high homogeneity of the temperature distribution along the slot. The average temperature values obtained using DLAS in the line-of-sight measurements along this direction in various parts of the flame are compared with the results of local temperature measurements along this line carried out using coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (CARS). Absolute values and profiles of temperature determined using DLAS are in a reasonable agreement with the results of CARS-measurements, and the differences at temperatures of ~ 1500-2100 K do not exceed 10%.

NON-INVASIVE GAS FLOW THERMOMETRY, ABSORPTION, DIODE LASER SPECTROSCOPY, RAMAN SCATTERING