

УДК 53.087.252

К.А. Верещагин, В.В. Смирнов, О.М. Стельмах, В.И. Фабелинский

*Институт общей физики им.А.М. Прохорова Российской академии наук, Россия, 119991,  
Москва, ул.Вавилова, 38, E-mail: vvs@kapella.gpi.ru*

## **ЭКСПРЕСС КАРС-ТЕРМОМЕТРИЯ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ**

*Продемонстрирована возможность лазерной КАРС-термометрии за время одного лазерного импульса (10 нс), основанной на одновременном измерении интенсивностей и ширины линий Q- ветви молекул водорода в импульсной камере сгорания  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ , работающей при высоких давлениях 20 МПа и температурах 3000К – параметрах, которые являются типичными для полномасштабных ракетных двигателей. Измерения были сделаны посредством спектрографа, объединенного с интерферометром, имеющими ортогональные направления дисперсии. Этот подход позволяет проводить измерение температуры, которое принимает во внимание ширины линий водорода, непосредственно измеренные в эксперименте.*

**КАРС ТЕРМОМЕТРИЯ, УГЛЕВОДОРОДНОЕ ГОРЕНИЕ, СПЕКТРЫ ВОДОРОДА, ИЗМЕРЕНИЯ ШИРИНЫ ЛИНИЙ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

Оптическая диагностика, из-за ее способности невозмущающих измерений, и получения детальной информации о процессах сгорания, уменьшает расходы на многократные и крупномасштабные моделирования. В частности КАРС спектроскопия, позволяющая обеспечить локальные измерения температуры и состава, является по сути единственным диагностическим методом, который дает возможность получать количественные данные непосредственно в камере сгорания в диапазоне давлений от 1 до 20 МПа и температур до 3000К. Для получения информации о газовых параметрах необходимо знать особенности спектров молекул реагентов и продуктов и их зависимости от температуры и плотности. Например, при КАРС термометрии водородосодержащих смесей, где водород используется как реперная молекула, для правильного определения температуры необходимо знать коэффициенты уширения линий водорода молекулами воды, являющуюся главным продуктом сгорания, их зависимость от вращательного квантового числа и температуры. Для водорода исследованы и могут быть использованы коэффициенты самоуширения в диапазоне температур 300 – 1200 К [1], коэффициенты уширения водой в диапазоне температур 600 – 1800 К [2, 3] и при температурах с 2100 до 3500 К, которые были измерены в [4]. Это позволяет, имея данные о плотности воды, правильно определять температуру газа.

Таким образом, в случае КАРС термометрии  $\text{H}_2/\text{O}_2$  пламен в диапазоне температур 300 – 3500 К, эти экспериментальные данные вместе с моделью расчета [3, 4], могут успешно использоваться. Однако, в случае горения углеводородных топлив проблема корректных измерений температуры все еще сохраняется. Это в первую очередь связано с отсутствием данных как о коэффициентах уширения линий водорода разными молекулами продуктами сгорания, типа  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , так и их температурной зависимости. Существенная экспериментальная проблема связана с необходимостью измерения концентраций этих компонент за один лазерный импульс.

Для преодоления этой проблемы при КАРС термометрии горения углеводородных смесей была предложена новая экспериментальная модификация КАРС спектроскопии, идея которой заключается в одновременном измерении интенсивностей и ширин линий водорода с помощью спектрометра и интерферометра, имеющих ортогональные направления дисперсии. В таком подходе при расчете температуры информация о ширине линии непосредственно измеряется за время лазерного импульса, и не требует знания ни коэффициентов уширения, ни плотностей молекулярных компонент продуктов. Испытание этого подхода было выполнено при измерении температуры в нагреваемой кювете, содержащей смесь  $H_2:N_2$  в соотношении 1:10. Водород использовался в качестве реперной молекулы.

В настоящей работе созданная система, демонстрирующая хорошие отношения сигнал/шум для средних температурных 1000 – 1200 К, была применена к измерениям при горении метана в кислороде при высоком давлении и высокой температуре, которые являются типичными для полномасштабных ракетных двигателей.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

### КАРС спектрометр

Схема экспериментальной установки, созданная в соответствии с этим подходом, представлено на рис.1. Используемый КАРС спектрометр был построен по двойной широкополосной схеме (dual broad band, DBB) и позволял одновременно регистрировать за один лазерный импульс интенсивности и ширины линий Q-ветви водорода. Для этого использовались спектрограф (Jobin-Yvon HR460, 1.8  $cm^{-1}/pixel$ ) и интерферометр Фабри-Перо (база 3 мм, аппаратная функция 0,067  $cm^{-1}$ ) с ортогональными направлениями дисперсий, а также двумерный многоканальный фотоприемник ("Андор" МСD). Интерферометр помещался перед входной щелью монохроматора.

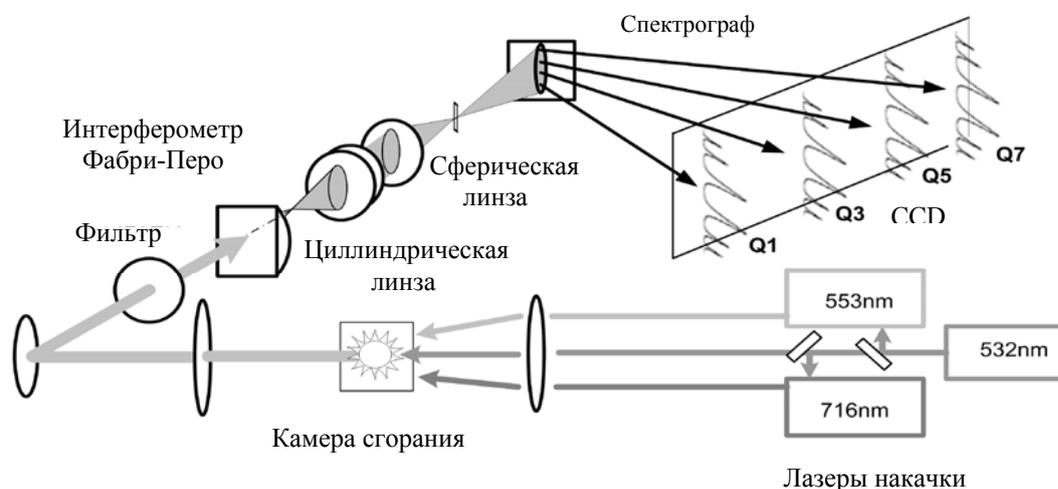


Рис. 1. Схема КАРС спектрометра

Лазерная часть КАРС спектрометра состояла из одночастотного лазера Nd:YAG лазер фирмы "Quantel" с шириной спектра  $\sim 100$  МГц, энергией в импульсе второй гармоники 200 мДж и двух широкополосных лазеров на красителях. Для возбуждения КАРС использовалось 30 мДж от излучения второй гармоники, а остальная часть направлялась для накачки

лазеров на красителях. Стабильность частоты и качество спектра Nd:YAG лазера контролировались измерителем длины волны LM007 фирмы “Кластер”. Лазер I на красителе (Родамином 6G) имел энергию в импульсе 4 мДж, ширину спектра  $170 \text{ см}^{-1}$  и центрировался на длине волны 553 нм. Лазер II (Пиридин 1) имел выходную энергию 3 мДж, ширину спектра  $350 \text{ см}^{-1}$  и центрировался на длине волны в 716 нм. Разница между центральными частотами двух лазеров составляла  $4000 \text{ см}^{-1}$ , и ширина конволюции их спектров позволила одновременную регистрацию Q1 – Q9 линии молекул водорода. Все пучки лазеров накачки согласовывались по направлениям и расходимостям и фокусировались в камеру сгорания, образуя конфигурацию планарного КАРС. При фокусировке линзой 300 мм пространственное разрешение в продольном и поперечном направлениях составляло 2,5 и 0,1 мм соответственно.

Анти-Стоксов луч КАРС после спектральной фильтрации коллимировался линзой, имеющей фокусное расстояние 300 мм и затем фокусировался в вертикальной плоскости цилиндрической линзой с фокусным расстоянием 150 мм. После интерферометра пучок фокусировался на щель монохроматора объективом с переменным фокусным расстоянием (для согласования размеров интерференционной картины с размерами фотоприемника) от 300 до 500 мм. В результате в плоскости выходной щели спектрографа формировалось двумерное изображение интерференционной картины - по горизонтали линии Q-ветви, имеющие разные длины волн в соответствии с разрешением и дисперсией спектрографа, а по вертикали интерференционные порядки с разрешением и дисперсией интерферометра. Считывание этой картины двумерным (1024 пикселей по вертикали на 256 пикселей по горизонтали) приемником было организовано следующим образом. По горизонтали активными были лишь 9 зон с шириной по 3 пикселя, каждая из которых центрировалась на соответствующую линию Q1 – Q9. Это позволяло существенно уменьшить время считывания и регистрировать полную картину с частотой следования 1 Гц.

#### ***CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> камера сгорания высокого давления***

CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> горелка имела камеру сгорания цилиндрической формы объемом  $9 \text{ см}^3$ . В боковых поверхностях цилиндрического объема имеются два соосных, постоянно открытых отверстия диаметром 1,0 мм обеспечивающие вытекание продуктов сгорания в атмосферу за время между двумя последовательными циклами работы горелки. Те же самые отверстия используются для ввода и вывода лазерных пучков из камеры сгорания. Поперечное сечение этих отверстий намного меньше размера трубок газовых магистралей, что обеспечивает при открытых клапанах и стационарном протоке газов соотношение давлений в камере и магистрали равными 0,87. Камера сгорания заполняется одновременно газами CH<sub>4</sub> и O<sub>2</sub> через два трубопровода, включающих импульсные электромагнитные клапаны. Начальное давление в камере могло быть изменено между 0,1 и 3,0 МПа. При входе в камеру сгорания новой порции рабочих газов происходит ее очистка от продуктов сгорания предыдущего цикла. После того, как электромагнитные клапаны закрываются, смесь поджигается свечой зажигания и за время горения в пределах нескольких десятков микросекунд давление и температура в камере повышаются до 10 раз. После этого продукты сгорания вытекают в течение нескольких миллисекунд. Существенным параметром, влияющим на результирующие давление и температуру в камере сгорания является массовое соотношение входных газов. Этот параметр измерялся двумя массовыми измерителями – регуляторами потока фирмы Bronkhorst.. Коэффициент избытка топлива  $\Phi$  изменялся в экспериментах в диапазоне 0,5 – 2,0. Давление в камере сгорания измерялось быстродействующим датчиком Kiestler 6061B. Горелочное устройство данной конструкции позволяло работать в периодическом режиме с частотой 1 – 5 Гц и получать в камере сгорания давления до 20 МПа и температуры до 3500 К.

#### **РЕЗУЛЬТАТЫ**

Экспериментально за один цикл работы горелки измерялось временное поведение давления (от момента поджига до полного истечения газов) и регистрировались спектры КАРС

молекул  $H_2$  и  $H_2O$ , обеспечивая качественную информацию о процессе горения и количественную о давлении и температуре. Время задержки КАРС зондирования относительно времени поджига могло варьироваться. На рис. 2 представлены результаты измерений для трех выбранных значений избытка топлива  $\Phi$ : слева графики давлений, справа спектры КАРС, полученные при задержках импульсов КАРС относительно фронта импульса давления  $\sim 100$  мкс.

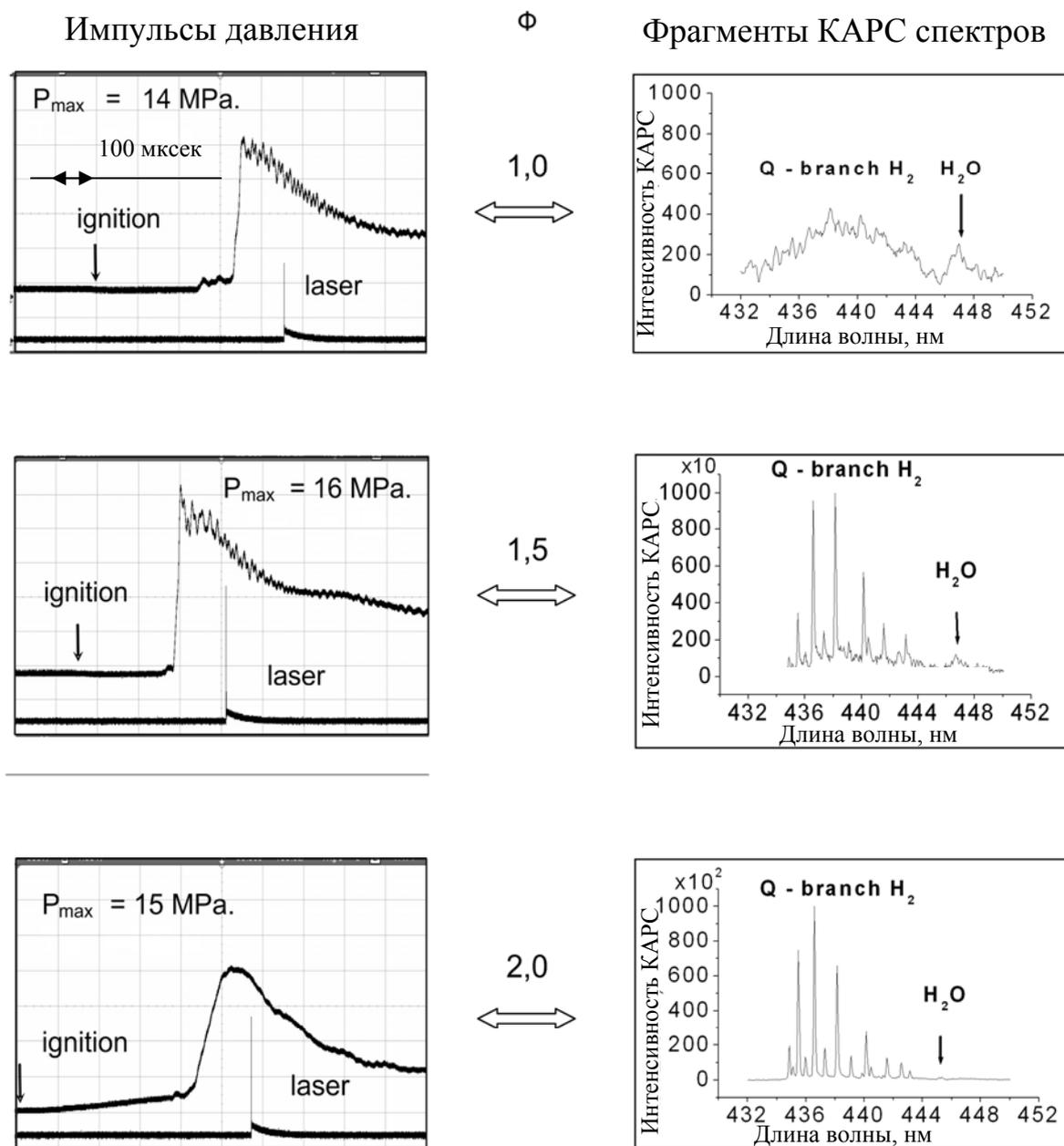


Рис. 2. Импульсы давления и спектры КАРС водорода, полученные в камере сгорания при коэффициентах избытка топлива  $\Phi = 1; 1,5$  и  $1,7$

На временах 100 – 200 мкс относительно поджига происходит плавное увеличение давления с дальнейшим существенным острым подъемом до 10 – 20 МПа в зависимости от начального значения давления и состава смеси. После окончания процесса горения давление в камере снижается из-за вытекания продуктов сгорания. Для выбора оптимального режима работы камеры сгорания, при котором реализуются максимальные значения давлений и температуры при наличии в продуктах сгорания водорода нами регистрировались спектры

КАРС (спектры регистрировались при удаленном интерферометре и представлены в правой части рис. 2). Как видно из рисунка, при горении стехиометрической смеси водород сгорает полностью в то время, как при богатых смесях уверенно регистрируются спектры КАРС водорода, присутствующего в продуктах в результате термического разложения метана. На основе этих спектров были измерены предварительные (без учета ширины линий) температуры, что позволило выбрать коэффициент избытка  $\Phi$ , при котором были получены максимальные значения давления  $P = 17$  МПа и температуры  $T = 3200$  К. Эти условия были выбраны для тестирования подхода КАРС термометрии, выполненного с применением схемы регистрации со скрещенными дисперсиями спектрографа и интерферометра.

Заключительные температурные измерения были выполнены с помощью описанного выше спектрометра (рис. 1) в богатой смеси ( $\Phi = 1,7$ ) при начальных давлениях 1,0; 1,5 и 2,0 МПа и задержках зондирования относительно момента воспламенения в диапазоне от 0,1 мс до 10 мс. Оптическая система формировала симметричное освещение интерферометра лучом КАРС, чтобы избежать искажений интерференционной картины на ССД приемнике. Все полученные интерферограммы показывали высокое отношение сигнал к шуму, которое было достаточно для одновременных измерений интенсивностей и ширины линий водорода от Q1 до Q9. На рис. 3 приведена одна из интерферограмм в трехмерном графическом представлении, полученная при начальном давлении смеси 2 МПа.

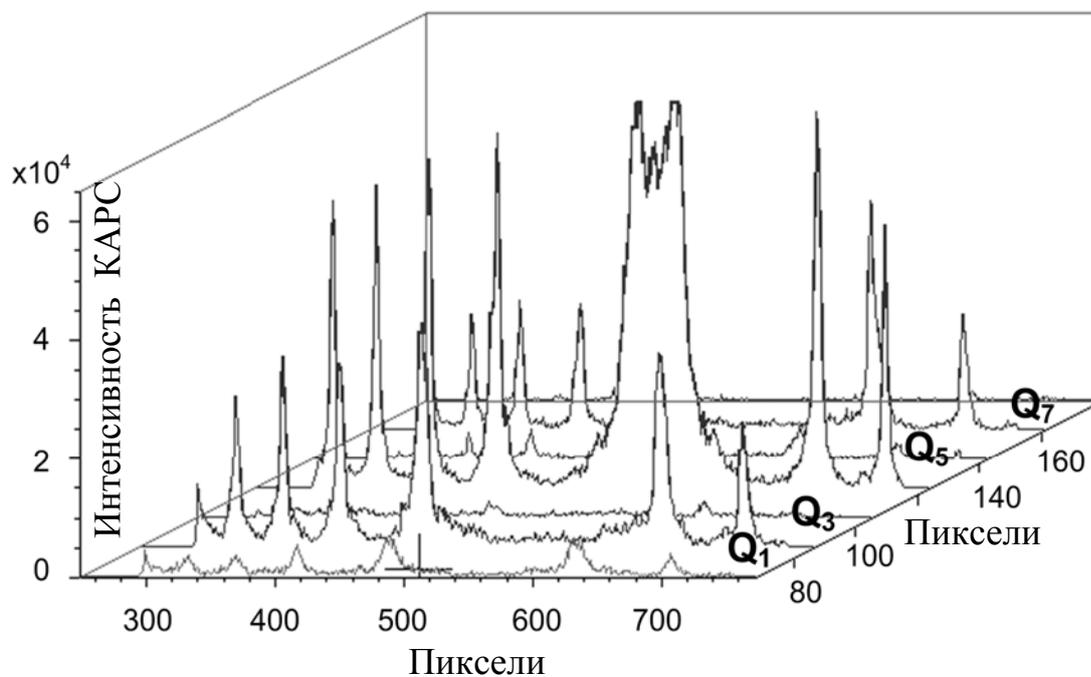


Рис. 3. Трехмерный вид интерферограммы КАРС спектра Q-ветви водорода, полученного за время одного лазерного импульса (10 нс)

Измерение ширины линии проводилось с использованием профилей интенсивностей правых частей интерферограмм для каждого из Q1 – Q9, для чего контура пиков интерферограмм в линеаризованной шкале подгонялись суперпозицией лоренцевых профилей свернутых с аппаратной функцией. На рис. 4 представлен результат такой процедуры для интерферограммы линии Q5, зарегистрированной при давлении в камере 16 МПа. Измеренные ширины линий Q1 – Q9 приведены на рис. 5.

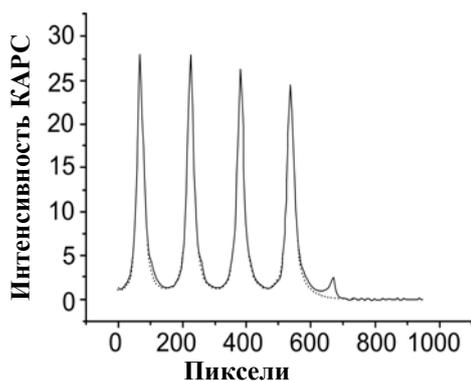


Рис. 4. Результат подгонки контуров интерферограммы линии Q 5 функцией Лоренца

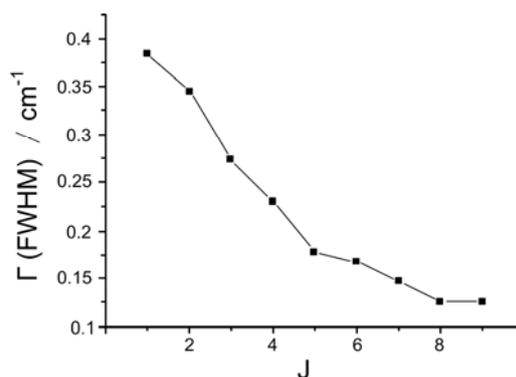


Рис. 5. Измеренные ширины линий Q1 – Q9 водорода

Несмотря на весьма хорошие и устойчивые результаты соответствующей процедуры подгонки и определения ширин линий, необходимо высказать некоторые замечания. В случае температурных измерений в пламени  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ , использующих переходы Q-ветви молекул  $\text{H}_2$  соответствующие линии КАРС спектров уширены столкновениями  $\text{H}_2$  с  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ , и другими продуктами сгорания, что может, помимо уширения, приводить к изменению формы линии. Например, как было показано [6, 7], контур линии Q-ветви водорода при столкновениях с азотом имеет неоднородно уширенный вклад, обусловленный зависимостью сечения вращательной релаксации от скорости молекул. Форма линии при этом становится асимметричной. Для описания этого эффекта, авторами [7] была развита модель, которая позволила им описывать форму линии и ее особенности, зависящие от температуры и соотношения концентраций  $\text{H}_2/\text{N}_2$ . В работе [8] был проведен детальный анализ температурной зависимости ширин линий водорода в смеси с азотом, на основании которого было показано, что использование лоренцева профиля вместо истинного асимметричного упрощает вычисление температуры без существенной потери точности измерения ( $< 3\%$ ).

В случае сгорания  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  смеси в продуктах сгорания доминирующую концентрацию имеют молекулы воды, уширение линий водорода которыми приводит к однородному и симметричному контуру с лоренцевой формой. Это позволяет предполагать, что линии водорода главным образом однородно уширены и вкладом от столкновений с  $\text{CO}_2$ , можно пренебречь из-за их существенно меньшей концентрации.

Для получения информации о температуре, интегральные интенсивности линий Q1 – Q9 были получены путем суммирования всех пиков интерферограммы по направлению дисперсии интерферометра. При этом значения интенсивностей для каждой линии Q-ветви были нормализованы на пространственный поперечный профиль интенсивности луча КАРС (рис. 4). В свою очередь интенсивности для различных линий Q-ветви были нормализованы на спектральный профиль нерезонансного спектра КАРС из воздуха, зарегистрированного на фотоприемник с удаленным интерферометром.

Измеренные интегральные интенсивности линий Q1 – Q9 при учете измеренных ширин их контуров дают информацию о распределении населенностей вращательных состояний  $J = 1 - J = 9$ , которое в случае равновесия имеет больцмановский вид, параметром которого является температура. Таким образом, измеренные за один лазерный импульс (длительностью 10 нс) интегральные интенсивности линий Q – ветви водорода и их ширины позволяют определить температуру. Временная эволюция измеренных значений давлений и температуры в камере сгорания  $\text{CH}_4/\text{O}_2$  представлена на рис. 6.

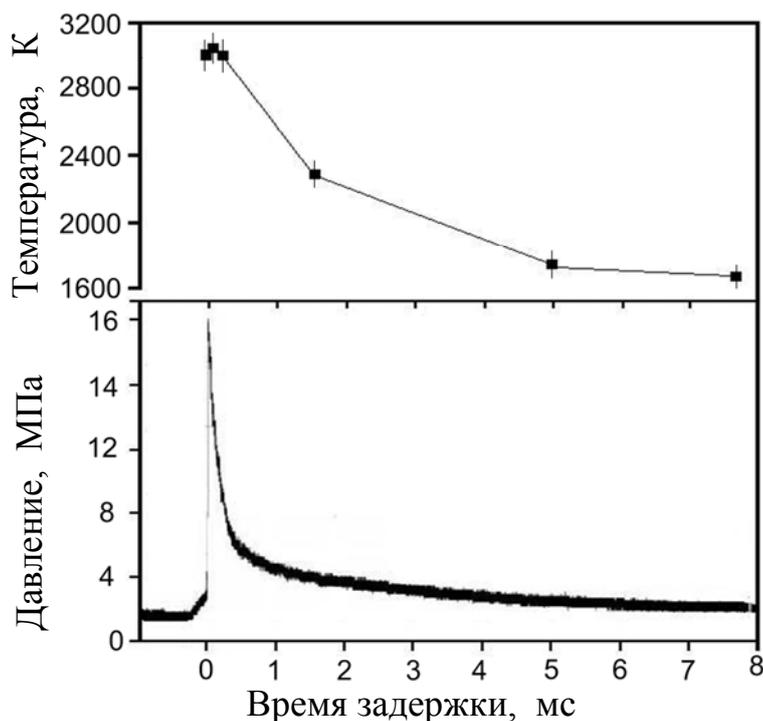


Рис.6. Временная эволюция измеренных значений давлений и температуры в камере сгорания  $\text{CH}_4/\text{O}_2$

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе приводятся результаты исследования нового подхода к экспресс - термометрии водородосодержащих пламен, основанного на одновременной (за длительность лазерного импульса (10 нс) регистрации интенсивностей и ширин линий КАРС спектра Q-ветви водорода с помощью спектрографа и интерферометра Фабри-Перо, имеющих ортогональные направления дисперсии. Главной целью этих экспериментов было исследование чувствительности и применимости предложенной техники, для измерения высоких температур 3000 К при давлениях газовых смесей 20 МПа.

Полученные результаты позволяют утверждать, что этот метод газовой термометрии может стать мощным инструментом экспериментального изучения процессов горения углеводородных топлив при высоких давлениях и температурах - типичных для ракетных двигателей.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны фонду РФФИ (грант № 10-08-01316-а) за финансовую поддержку данной работы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rahn L.A., Farrow R.L., Rosasco G.J.** Phys. Rev. A. 1991; 43, 6075.
2. **Berger J-P.** Mécanismes de relaxation collisionnelle dans l'hydrogene et l'azote en mélange gazeux. Application a la thermometrie optique dans les moteurs cryogeniques et les moteurs a combustion interne, These de Doctorat, Universite de Bourgogne, Dijon, 1994.
3. **Chaussard F., Michaut X., Saint-Loup R., Berger H., Joubert P., Bonamy J., Robert D.** Poster presentation at ECONOS Villigen (Germany), 18-19 of March, 2002.
4. **Vereschagin K.A., Vereschagin A.K., Smirnov V.V., Stel'makh O.M., Fabelinsky V.I., Clauss W., Oswald M.** Journal of Raman Spectroscopy, 2008; 39,722.

5. Fabelinsky V.I., Smirnov V.V., Stel'makh O.M., Vereschagin K.A., Vereschagin A.K., Clauss W., Oschwald M., Journal of Raman Spectroscopy, 2007; 38, 989.
6. Farrow R.L., Rahn L.A., Sitz G.O., Rosasko G.J., Phys.Rev.Lett. 1989; 63, 746.
7. Sinclair P.M., Berger J.Ph., Michaut X., Saint-Loup R., Chaux R., Berger H., Bonamy J., Robert D., Phys.Rev. A. 1996; 54, 1996.
8. Hussong J., Stricker W., Bruet X., Joubert P., Bonamy J., Robert D., Michaut X., Gabard T., Berger H., Appl.Phys.B. 2000; 70, 447.

K.A.Vereschagin, V.V. Smirnov, O.M. Stel'makh, V.I. Fabelinsky

General Physics Institute, IOFAN, Vavilov Str. 38, 119991 Moscow,  
Russia, e-mail:vvs@kapella.gpi.ru

### **EXPRESS CARS THERMOMETRY OF HYDROCARBON COMBUSTION AT HIGH PRESSURE**

*We demonstrate the feasibility of single laser shot CARS thermometry with simultaneous measurement of intensities of hydrogen Q-branch lines and their line widths in a pulsed CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> combustion chamber operating at 20 MPa pressure and 3000 K temperature – the parameters that are typical for full-scale rocket engines. The measurements were done by means of a spectrograph combined with an interferometer having orthogonal directions of dispersions. This approach allows correct temperature evaluation that takes into account directly measured line widths.*

**CARS, THERMOMETRY, HYDROCARBON BURNING, HYDROGEN SPECTRUM, LINE WIDTH MEASUREMENT**