

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

КАРС ДИАГНОСТИКА ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ H_2/O_2 , CH_4/O_2 СМЕСЕЙ В ИМПУЛЬСНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ

Представлены результаты применения метода спектроскопии Когерентного анти - Стоксового рассеяния света (КАРС) для диагностики газовых параметров в импульсной камере сгорания, сконструированной для моделирования процессов горения водородного и углеводородного топлив с кислородом и получения газов – продуктов сгорания, находящихся при высоких температурах (до 3500 К) и давлениях (до 20 МПа). Помимо характеристик таких параметров газовой среды, как температура, относительные концентрации реагентов и продуктов горения и их временного поведения исследовались методические аспекты КАРС термометрии, связанные с оптимальным выбором молекул – диагностических маркеров и особенностями вида их спектров, зависящими от температуры и давления.

КАРС ТЕРМОМЕТРИЯ, УГЛЕВОДОРОДНОЕ ГОРЕНИЕ, СПЕКТРЫ ВОДОРОДА

ВВЕДЕНИЕ

При изучении и оптимизации как самих процессов горения, так и камер сгорания в настоящее время преимущественно используются лазерные бесконтактные невозмущающие методы такие, как лазерная индуцированная флюоресценция (ЛИФ) [1], лазерная анемометрия [2], когерентное анти-Стоксово рассеяние света (КАРС) [3]. При этом следует отметить, что основываясь на спектрах детектируемых молекул, атомов и радикалов, эти методы требуют проведение исследований и получения дополнительных сведений об особенностях регистрируемых спектров, характерных для высоких значений температуры и давлений. Полученные при таких условиях спектры молекул позволяют сделать выбор наиболее предпочтительных из них для измерения температуры и других параметров. Так, например, особенности спектров КАРС молекул водорода при высоких температурах 1000 – 3000 К, проявляющиеся, например, в сдвигах и уширениях спектральных линий, напрямую связаны с точностью определения температуры и были исследованы в работах [4 – 7].

Для разработки и тестирования диагностических методик нами была сконструирована компактная камера сгорания, работающая в лабораторных условиях в импульсно – периодическом режиме. Это устройство с малым объемом камеры и начальным давлением рабочей смеси до 2,0 МПа позволяет получать высокие (~ 20 МПа) давления продуктов сгорания при температурах до 3000 К. Импульсный режим работы и нестационарность условий в камере сгорания требуют, чтобы все необходимые измерения были выполнены в течение одного лазерного импульса, синхронизированного с циклом горения.

Для характеристики работы камеры сгорания и, в частности, для измерения локальных значений температуры и качественного состава исходных веществ и продуктов сгорания нами использовался метод когерентного анти-Стоксова рассеяния света (КАРС). Этот метод невозмущающей диагностики, обладая высокой локальностью, является по сути

единственным методом, позволяющим получать количественную информацию о температуре и составе пламен в диапазоне давлений от 0,1 до 10 МПа и температур от 10 до 3500 К.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И РЕЗУЛЬТАТЫ

Импульсная камера сгорания высокого давления

Для моделирования процессов горения и верификации диагностических методик разрабатываются различные модельные горельные устройства, примером которых может служить горелка Маккены [8]. Это устройство характеризуется высокой стабильностью и воспроизводимостью параметров.

Особенностью предлагаемой камеры сгорания является возможность получать продукты сгорания при высоких температурах и давлениях. При ее проектировании геометрия и размеры выбирались из соображений экономичного компактного лабораторного использования. Применение методики КАРС позволяет выполнить условие, при котором диагностируемая область существенно меньше, чем объем камеры. При размере области перекрытия лазерных пучков $1 \times 0,1 \times 0,1$ мм, соответствующий объем зондирования составляет 10^{-5} см³.

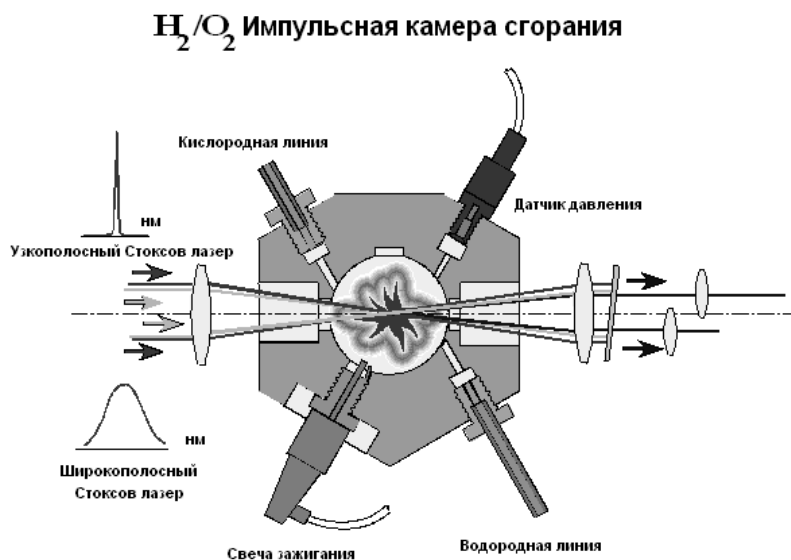


Рис.1. Импульсная камера сгорания высокого давления

На рис. 1 схематически представлена конструкция импульсной камеры сгорания высокого давления (ИКВД). Камера сгорания, выполненная из жаропрочной нержавеющей стали, представляет из себя цилиндр объемом ~ 8 см³, в образующей которого имеются отверстия для размещения двух импульсных клапанов системы напуска, свечи поджига рабочей смеси и быстродействующего датчика - измерителя давления. Для вывода продуктов сгорания и очистки камеры перед следующим рабочим циклом предусмотрены два соосных отверстия с диаметрами ~ 1 мм, через которые также вводятся лазерные пучки и выводится излучение КАРС.

Генератор импульсов, управляющих клапанами системы напуска, позволяет менять как длительность импульсов управления (от 10 мс до 300 мс), так и их взаимное временное расположение. В целях безопасности работы системы напуска, импульс управления поджигом генерируется сразу после закрытия клапана системы напуска топлива. Управляя задержкой импульса запуска лазера, можно перемещать момент зондирования относительно импульса поджига смеси. Это дает возможность проводить КАРС-зондирование в различные моменты времени как до, так и после поджига смеси, то есть на всех стадиях рабочего цикла ИКВД.

Измерения давления в камере сгорания на стадиях напуска, горения и истечения продуктов в каждом рабочем цикле выполнялись с помощью пьезоэлектрического датчика давления Kistler 6061В, вмонтированного в стенку камеры сгорания. Перед измерениями датчик калибровался в диапазоне от 0,1 до 15 МПа. В течение эксперимента сигнал с усилителя датчика давления оцифровывался двухканальным АЦП и сохранялся на жестком диске компьютера; второй канал АЦП использовался для оцифровки сигнала быстрого фотодиода, который регистрировал лазерный импульс. Такая двухканальная регистрация позволяла определять давление именно в момент времени КАРС-зондирования камеры сгорания.

На рис. 2 представлены формы импульсов давления при горении водорода (а) и метана (б). Характерным в форме наблюдаемых импульсов является более острый фронт нарастания при горении водорода, что объясняется большей скоростью его горения. Отличительной особенностью в форме импульса при горении метана является наличие “предфронта”,

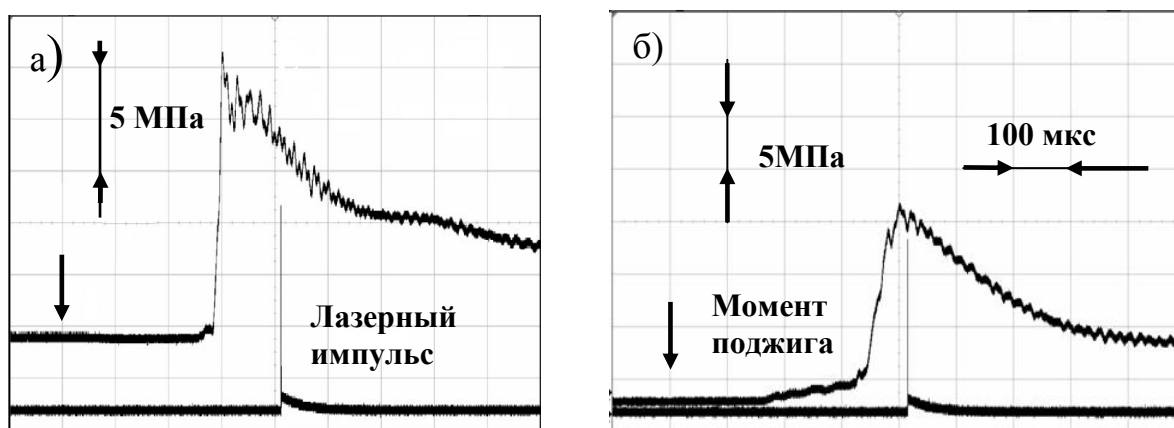


Рис. 2. Формы импульсов давления на стадии горения а) водорода и б) метана

длительность которого зависит от состава смеси и может быть интерпретирована большим временем развития горения метаново-кислородной смеси. Нами были проведены также изменения реализуемых в камере параметров давления в зависимости от коэффициента избытка топлива Φ . На рис. 3 представлены измеренные времена задержки фронта импульса давления относительно импульса поджига в зависимости от коэффициента избытка топлива

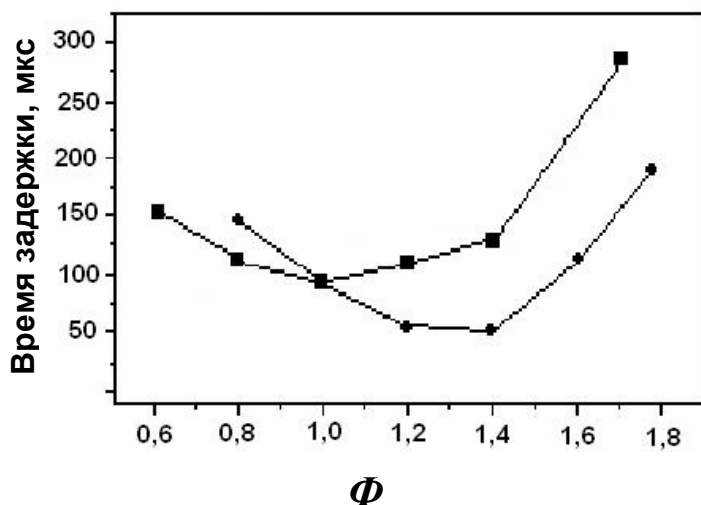


Рис. 3. Задержки импульса давления относительно импульса поджига в зависимости от коэффициента избытка топлива; ■ – H₂/O₂, ● – CH₄/O₂

Φ . При этом следует отметить, что наблюдаемое время отражает два процесса, а именно, физическое время развития горения в определенной точке камеры вблизи свечи поджига и время распространения горения в пространстве от места поджига до стенок камеры и определяется последним, как наиболее медленным из них.

На рис. 4 приведены измеренные амплитуды импульсов давления в зависимости от коэффициента избытка топлива Φ при горение H_2/O_2 и CH_4/O_2 смесей.

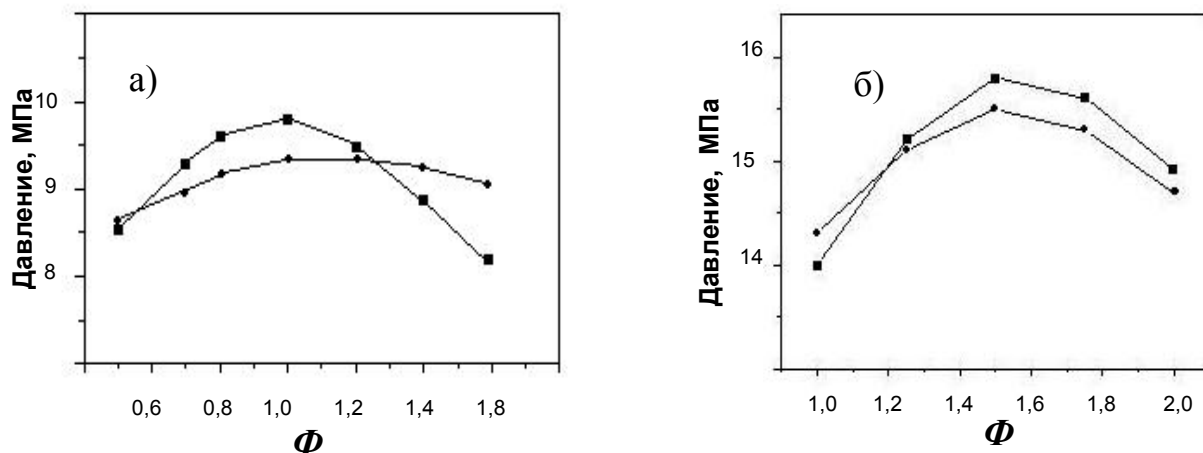


Рис. 4. Амплитуда импульса давления в зависимости от коэффициента избытка окислителя а) горение H_2/O_2 смеси. Начальное давление – 0,9 МПа ; б) горение CH_4/O_2 смеси. Начальное давление – 1,5 МПа. ■ – эксперимент, ● – расчет по программе GASEQ [9]

Из графика видно, что при начальных давлениях напуска в камере 0,9 МПа и Φ равным единице для водорода удается достичь максимальных давлений 10 МПа. Соотношение массовых расходов компонент в максимуме кривых близко к стехиометрической смеси для водорода и смещено в сторону избытка топлива при горении метана. Для сравнения на рисунках приведены кривые, полученные на основе расчета с использованием программы GASEQ [9] в приближении адиабатического горения.

Для оценки стабильности работы ИКВД мы анализировали эпюры давления для серии из 50 последовательных циклов, реализующихся при заданных расходах горючего и окислителя. Импульсы давления от цикла к циклу имели подобную форму, слегка отличаясь друг от друга как максимальной амплитудой, так и положением пика максимума во времени. Относительное стандартное отклонение для положений пиков составляет обычно ~4 % и для амплитуд максимумов ~ 5 – 6 %.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что сконструированная импульсная камера сгорания высокого давления обладает воспроизводимыми и контролируемыми параметрами и представляет собой удобный лабораторный инструмент для отработки диагностических методик.

КАРС как диагностическая методика определения температуры

Для определения температура в камере сгорания использовалась методика когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС). Следует при этом отметить, что нас интересовали как непосредственно результаты по измерению температуры, так и методические аспекты КАРС термометрии, связанные с оптимальным выбором молекул – диагностических маркеров и особенностями вида их спектров, зависящими от температуры, давления и стехиометрии.

Лазеры и система регистрации

При выборе схем КАРС-спектрометров мы исходили из следующих соображений. Для измерения температуры необходимо за один лазерный импульс регистрировать значительный фрагмент КАРС спектра ($\sim 300 \text{ см}^{-1}$), в который попадают линии Q-ветви водорода и Q-ветви колебания $\nu = 1$ молекулы воды. Отсюда следует необходимость использования схемы «широкополосного» КАРС (Broad-band CARS) [3]. Для реализации этой схемы необходимо излучение двух лазеров: излучение накачки с узким спектром, в качестве которого использовалось излучение второй гармоники YAG:Nd лазера и широкополосное излучение Стоксова лазера на красителе. Разность частот двух лазеров настраивается в соответствии с комбинационными сдвигами частот молекул водорода и воды. При этом широкий спектр лазера на красителе позволяет возбуждать одновременно переходы Q-ветвей этих молекул за одну лазерную вспышку (см. рис. 5). Добавление еще одного Стоксова лазера на красителе, накачиваемого одновременно с первым и настраиваемого, например, на переходы молекул метана, позволяет по интенсивностям линий наблюдаемых переходов судить об относительных концентрациях молекул воды, водорода и метана в зондируемом объеме. В качестве источника накачки как процессов КАРС, так и Стоксовых лазеров используется излучение второй гармоники одночастотного (ширина спектра $\sim 100 \text{ МГц}$) Nd³⁺:YAG лазера “Infinity” фирмы “Coherent Radiation”. Типично энергия выхода на длине волны излучения 532 нм в импульсе длительностью 3 нс составляет 100 – 120 мДж и распределяется следующим образом. Энергия «накачки» процесса КАРС составляет 10 – 15 мДж. На накачку каждого из Стоксовых лазеров используется по 25 мДж. Все Стоксовые лазеры имеют подобную схему генератор/усилитель, где используются растворы органических красителей (Pyridine, Rhodamin) в метаноле. Генератор Стоксового лазера канала измерения температуры представляет собой «безмодовый» осциллятор с поперечной накачкой, собранный по схеме двухпроходного усилителя с одним задним зеркалом. Излучение генератора усиливается в однопроходном усилителе на красителе с поперечной накачкой. Его выходная энергия составляет $\sim 3 \text{ мДж}$ при ширине спектра более 500 см^{-1} . Для повышения пространственного разрешения используется геометрия взаимодействия лазерных лучей “планарный КАРС” [3]. При этом пучок накачки и Стоксов пучок распространяются параллельно с разделением в пространстве приблизительно на 10 мм. При фокусировке этих пучков линзой ($f = 300 \text{ мм}$) они пересекаются в фокальной области под небольшим углом, что позволяет избежать генерации сигналов КАРС в среде из областей, находящихся вне зондируемого объема. Спектр КАРС регистрируется стробируемым со временем 10 нс многоканальным линейным фотоприемником (Scientific Instrument), расположенным в фокальной плоскости спектрографа (Jobin Yvon, THR1000) с фокальным расстоянием 1 м.

Работа комплекса

Эксперимент выполнялся следующим образом. При работающей с частотой 1 Гц горелке устанавливались заданные начальные давления и значения объемных расходов H₂ и O₂ потоков. Длина волны первого лазера настраивалась соответственно частоте комбинационного сдвига линий Q-ветви водорода и воды, а длина волны другого лазера выбиралась с учетом перекрытия с линиями Q-ветви полносимметричного колебания ν_1 молекулы метана. После установления выбранной задержки между моментами воспламенения и лазерными импульсами зондирования записывались 50 синхронизированных, как с поджигом, так и между собой, файлов по каждому из трех каналов.

КАРС диагностика

Обычно при КАРС-диагностике горения информация о температуре и плотности в исследуемой среде извлекается из спектров КАРС, полученных из зондируемого объема

внутри камеры сгорания. При этом температура определяется по наилучшему совпадению экспериментальных и теоретических спектров, рассчитанных с некоторым шагом по температуре. Точность определения газовых параметров зависит как от корректности модели, используемой для расчета КАРС-спектров, так и от надежности экспериментальных спектроскопических и кинетических данных о положениях и ширинах контуров линий спектра.

При кислородно-водородном горении для термометрии удобно использовать вращательно-колебательные спектры Q-ветви молекул водорода.

Благодаря небольшому переобогащению смеси в кислородно-водородном пламени в исследуемом объеме всегда присутствуют молекулы водорода. Одной из задач данной работы также являлось расширение возможностей КАРС термометрии при необходимости работать с бедными смесями, где в качестве маркера могут быть использованы другие молекулы – продукты сгорания, например, молекулы воды. При этом следует отметить, что возможность реализации широкополосной схемы КАРС с одновременной регистрацией спектров водорода и воды за длительность одного лазерного импульса существенно увеличивает информативность диагностики, позволяя судить о полноте сгорания, а также термометрии, особенно в условиях диагностики нестационарных турбулентных пламен с сильно меняющейся локальной стехиометрией.

На рис. 5 приведены полученные при горении смеси H_2/O_2 смеси спектры КАРС, содержащие одновременно регистрируемые линии переходов молекул воды и водорода.

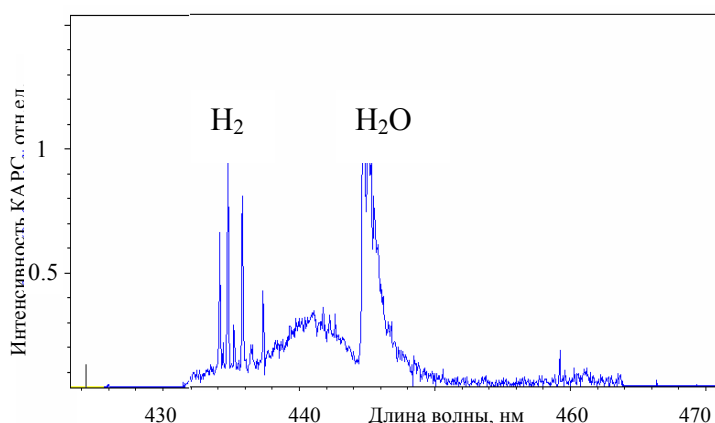


Рис 5. Фрагмент КАРС спектра, содержащий линии переходов Q-ветви молекул водорода и Q-ветви колебания $\nu = 1$ молекул воды

При определении температуры на основе интенсивностей линий Q-ветви колебательно-вращательных переходов водорода нами принималась во внимание J-зависимость коэффициентов уширения линий, обусловленная столкновениями с молекулами воды. Это влияние является определяющим, поскольку вода является основным продуктом сгорания и составляет 40 % – 50 %. В расчетах использовались исследованные ранее температурные изменения этой зависимости в диапазонах 300 К – 1800 К [4, 5] и 2000 К – 3500 К [6, 7]. На рис. 6 приведен результат определения температуры на основе описанной процедуры с наилучшим совпадением экспериментального и расчетного спектров при $T = 3400$ К. Ошибка определения температуры, измеренной за один лазерный импульс, составляет 80 К. Как отмечалось выше, в случае диагностики горения бедных смесей или локального выгорания водорода для определения температуры могут быть использованы линии переходов Q-ветви колебания $\nu = 1$ молекул воды. В силу существенно меньших значений вращательной постоянной и константы колебательно вращательного взаимодействия у молекул воды в сравнении с молекулами водорода КАРС спектр отличается от спектра водорода наличием большего количества линии и их существенным перекрытием. Это приводит к тому, что спектр воды уже при плотностях больших 1 Amagat представляет неразрешаемый контур и для определения температуры используется изменяющийся с температурой и плотностью вид его формы (рис. 7).

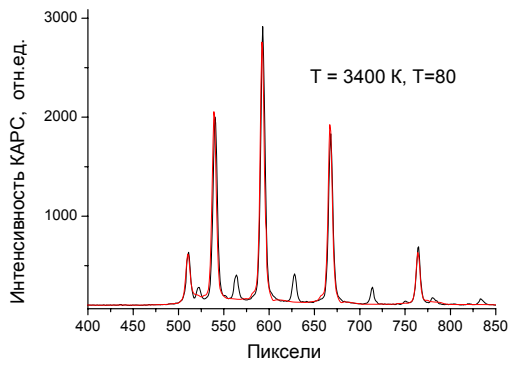


Рис. 6. Иллюстрация процедуры подгонки экспериментального (черн.) и расчетного (приняты в расчет только нечетные линии, красн.) спектра Q-ветви

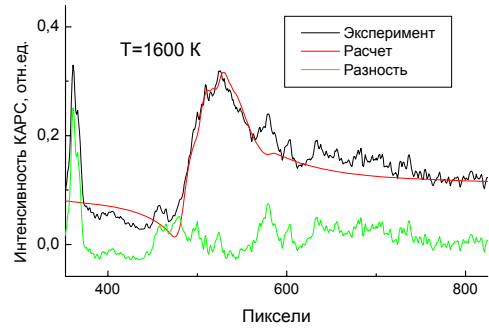


Рис. 7. Иллюстрация процедуры подгонки экспериментального (черн.) и расчетного (красн.) спектров Q-ветви колебания $\nu = 1$ молекул воды

На основе имеющихся данных о положениях линий и особенностях уширения линий воды [10 – 12] была создана программа расчета формы спектра Q-ветви, на основе которой была рассчитана библиотека спектров. Параметрами таких спектров являются плотность и температура, определение которых осуществляется на основе программы подгонки расчетных спектров к экспериментальным по критерию наилучшего совпадения их формы. На рис. 7 представлен результат такой процедуры, которая дает значения температуры в области 2000 К с точностью 6 %.

При горении смеси CH_4/O_2 нами было исследовано временное поведение основных газовых параметров – температуры и относительных концентраций продуктов как на стадии развития горения, так и при истечении продуктов из камеры сгорания. Для этого с задержкой во времени относительно импульса поджига регистрировались спектры КАРС в двух спектральных областях (рис. 8). В первой области (430 – 470 нм) располагаются спектры молекул CH_4 , H_2 и H_2O , регистрируемые одновременно за каждую лазерную вспышку.

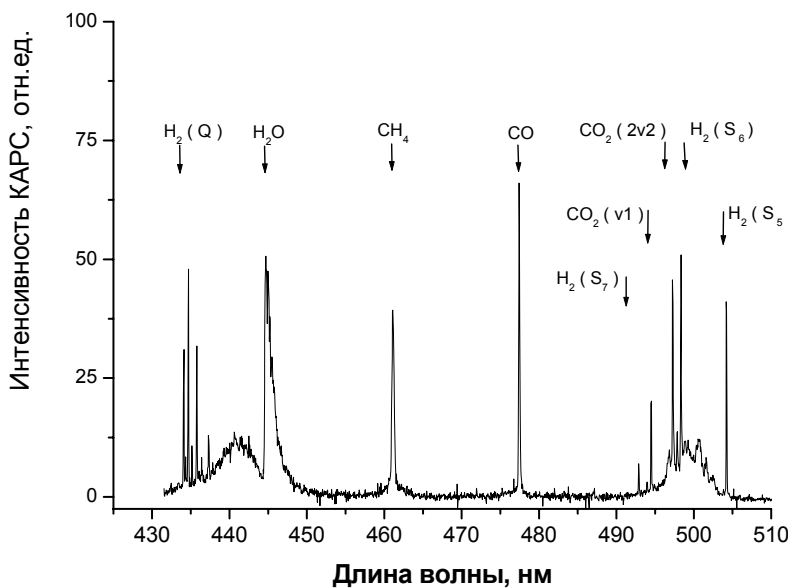


Рис. 8. Обзорный КАРС спектр молекул, регистрируемых в камере сгорания CH_4/O_2 смеси

Во второй области (470 – 510 нм) находятся спектры чисто вращательных переходов

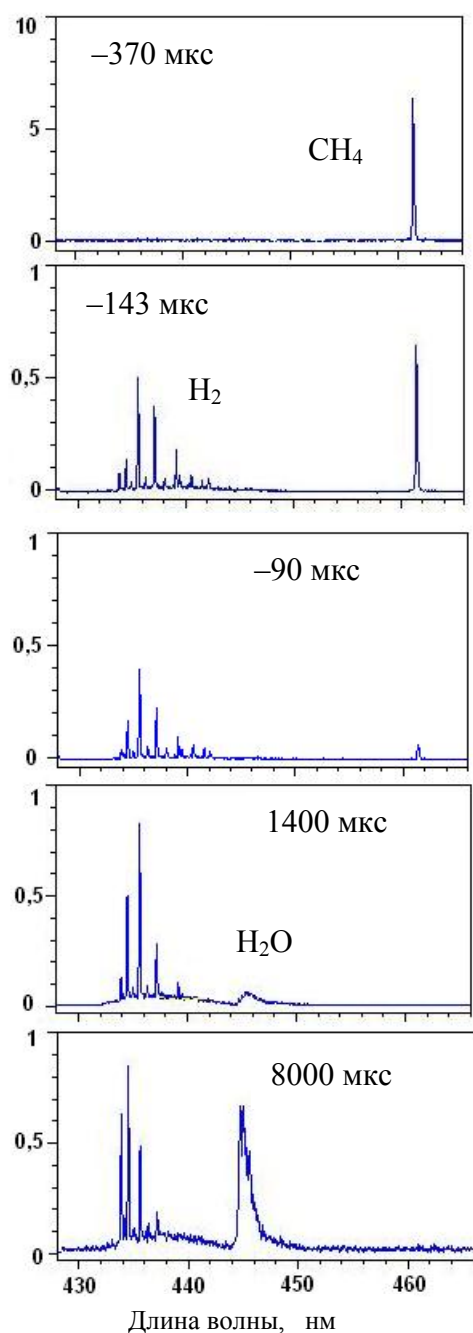


Рис. 9. Серия КАРС спектров молекул CH_4 , H_2 и H_2O , регистрируемых в первой области при различных временах задержки относительно импульса поджига

а также оценки качественных характеристик процесса горения (смешение, полнота сгорания).

На основе полученных КАРС спектров водорода в этой области определялась температура в горелке в зависимости от задержки момента зондирования относительно поджига. Это позволило сопоставить временное поведение давления и температуры в камере сгорания как на фазе горения, так и в процессе истечения горячих продуктов сгорания (рис. 10).

Здесь необходимо отметить, что для корректного измерения температуры, реализованная выше для H_2/O_2 пламени и учитывающей данные о температурной зависимости уширения различных линий водорода водой процедура не является корректной, т.к. помимо воды (в случае горения водорода) в столкновениях с водородом участвуют

молекул водорода с $J = 5, 6$ и 7 , спектр Q – ветви молекул CO и колебательно-вращательные полосы ν_1 и $2\nu_2$ молекул CO_2 . Наблюдаемые особенности полученных спектров позволяют сделать выводы о возможности КАРС спектроскопии для диагностики процесса горения CH_4/O_2 смесей, а также о возможности использования некоторых из перечисленных молекул продуктов сгорания в качестве реперов для термометрии. На рис. 9 приведена серия спектров, регистрируемых в первой области в зависимости от времени задержки относительно импульса поджига.

Анализ полученных спектров указывает на ряд особенностей развития процесса горения. Так видно, уже на временах, соответствующих пре-фронту импульса давления, происходит заметное разложение метана и появление молекул водорода. Ввиду того, что молекулы метана подвержены интенсивному разложению при температурах выше 1500 K , спектры молекул метана при больших температурах не могут быть использованы для термометрии. Интенсивность линий спектров водорода на порядок превосходит интенсивность КАРС спектра воды ввиду того, что при высоких температурах ($2000 - 3000 \text{ K}$) статсумма по вращательным переходам воды существенно превосходит соответствующую статсумму для водорода. Тем не менее, как спектры водорода, так и воды могут быть пригодны для термометрии,

другие молекулы-продукты горения метана. Ввиду этого для измерения температуры была использована модифицированная схема КАРС спектрометра [13], позволяющая одновременно регистрировать не только интенсивности линий Q-ветви водорода, но и их ширины.

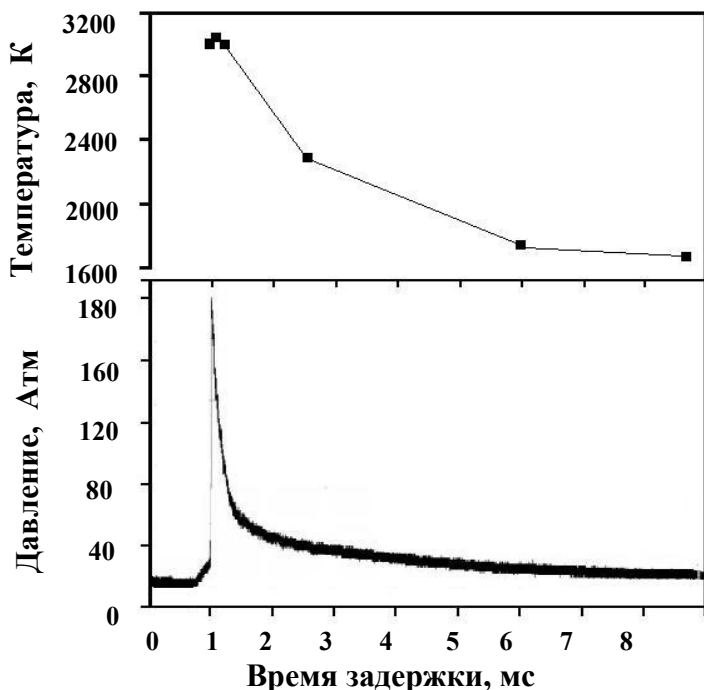


Рис. 10. Временное поведение температуры (вверху) и давления (внизу), измеренных в камере сгорания. Время измеряется относительно начала импульса давления

Также исследовалась зависимость температуры, получаемой в камере сгорания от состава подаваемой смеси. Данные, полученные в момент зондирования через 100 мкс от фронта импульса давления, представлены на рис. 11. Для сравнения на этом же рисунке приведены результаты расчета, полученные с помощью программы GASEQ в приближении адиабатического горения.

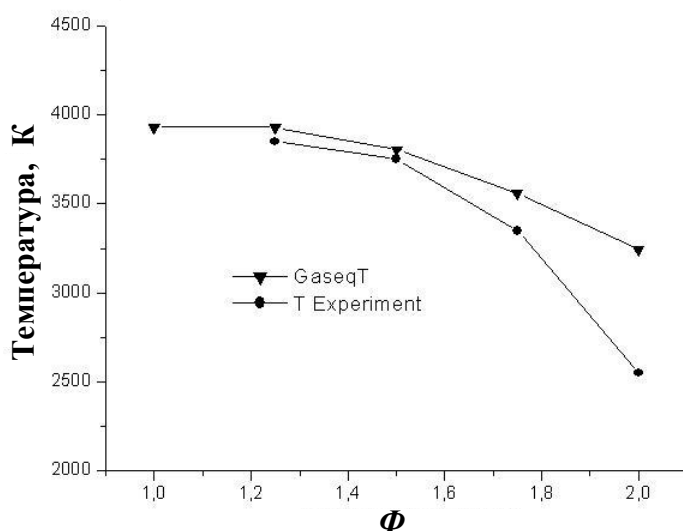


Рис. 11. Зависимость температуры продуктов сгорания CH_4/O_2 смеси от избытка топлива Φ . Время задержки момента зондирования относительно импульса горения 100 мксек. \blacktriangledown – эксперимент. \bullet – расчет по программе GASEQ

Во второй области (470 – 510 нм), представленной на рис. 8, находятся спектры чисто вращательных переходов молекул водорода с $J = 5, 6$ и 7 , Q-ветви молекул O_2 и колебательно-вращательных полос ν_1 и $2\nu_2$ и их “горячих” переходов молекул CO_2 .

Для иллюстрации особенностей спектров, соответствующих различным режимам горения, на рис. 12 представлены фрагменты КАРС спектров, полученных за один лазерный импульс. Фрагмент 1 соответствует фазе напуска и содержит неразрешенный спектр Q-ветви молекулы кислорода. Фрагмент 2 получен при горении бедной смеси при задержке регистрации относительно поджига 1000 мкс и отражает уменьшенное содержание кислорода и появление продукта – молекул CO_2 . Фрагмент 3 снят также в бедной смеси при задержке 4000 мкс и указывает на полное сгорание кислорода и наличие продукта – CO_2 . Как видно, спектр содержит линии полос ν_1 и $2\nu_2$ молекул CO_2 и соответствующие линии горячих полос, характерных для температуры в области 1500 К. Фрагмент 4 получен в условиях горения богатой смеси при задержке 1500 мкс и содержит помимо полос ν_1 и $2\nu_2$ молекул CO_2 линии вращательных переходов S6 и S7 молекул водорода. Следует отметить, что водород, как продукт разложения метана, при горении богатых смесей появляется уже на фазе горения, соответствующей фронту импульса давления, о чем свидетельствует спектр, снятый при задержке –20 мкс и представленный на фрагменте 5.

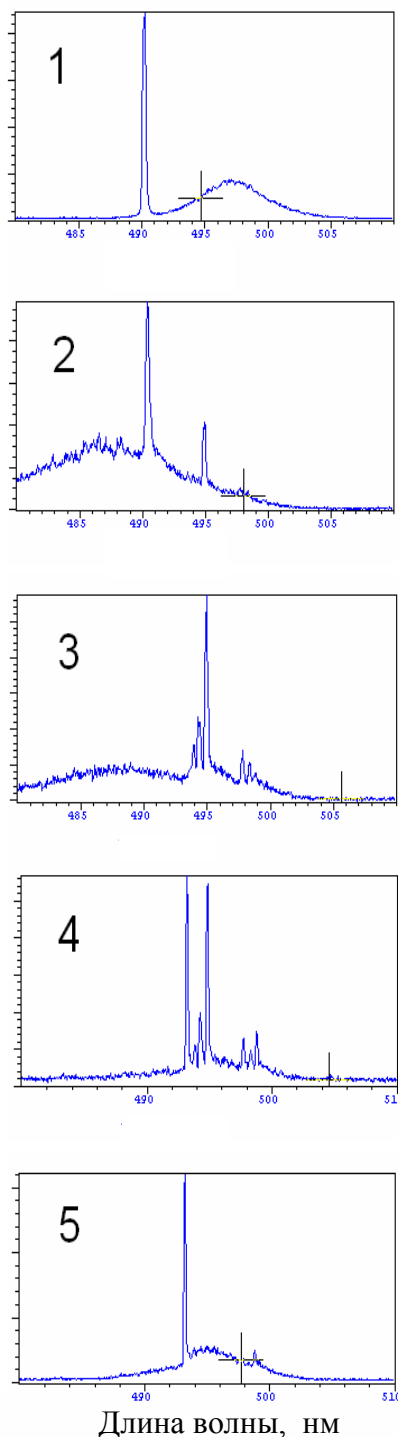


Рис. 12. Фрагменты спектров КАРС молекул O_2 , H_2 и CO_2 , полученные при различных значениях избытках топлива и задержках относительно поджига

полос ν_1 и $2\nu_2$ и “горячих” переходов молекул CO_2 .

Характеризуя особенности спектров молекул O_2 , H_2 , CO и CO_2 , регистрируемых во второй области и представленных на рис. 8 и 12 можно сделать следующие выводы об их использовании в задачах КАРС-термометрии углеводородно-кислородных пламен. Прежде всего необходимо отметить, что проводимый ниже анализ предусматривает решение задач экспресс-термометрии (измерения за один лазерный импульс) с регистрацией широкополосного спектра, содержащего полосы как минимум двух молекул и использованием наиболее широко применяемого в экспериментах спектрографа с фокусным расстоянием 1 м, решеткой 2400 штр/мм и аппаратной функцией $\sim 0,9 \text{ см}^{-1}$ (в данном случае THR-1000 фирмы Jobin Ivon). Спектры Q-ветви молекул O_2 , имея характерное расстояние между наиболее интенсивными линиями $0,5 \text{ см}^{-1}$ [14], не будут разрешаться даже при низких давлениях и форма контура, искаженная аппаратной функцией, будет слабо чувствительна к изменениям температуры. В богатых смесях, помимо линий Q-ветви, три изолированных линии S5, S6 и S7, относящиеся к чисто вращательным переходам молекул водорода, могут также быть использованы для определения температур в диапазоне 2000 – 3500 К. Процедура и точность определения температуры по двум линиям вращательных переходов водорода нами была детально исследована и представлена в работе [15]. В случае бедных смесей, когда молекулы водорода в газовой смеси отсутствуют, помимо спектров воды, могут быть использованы линии

Характеризуя особенности спектров молекул O_2 , H_2 , CO и CO_2 , регистрируемых во второй области и представленных на рис. 8 и 12 можно сделать следующие выводы об их использовании в задачах КАРС-термометрии углеводородно-кислородных пламен. Прежде всего необходимо отметить, что проводимый ниже анализ предусматривает решение задач экспресс-термометрии (измерения за один лазерный импульс) с регистрацией широкополосного спектра, содержащего полосы как минимум двух молекул и использованием наиболее широко применяемого в экспериментах спектрографа с фокусным расстоянием 1 м, решеткой 2400 штр/мм и аппаратной функцией $\sim 0,9 \text{ см}^{-1}$ (в данном случае THR-1000 фирмы Jobin Ivon). Спектры Q-ветви молекул O_2 , имея характерное расстояние между наиболее интенсивными линиями $0,5 \text{ см}^{-1}$ [14], не будут разрешаться даже при низких давлениях и форма контура, искаженная аппаратной функцией, будет слабо чувствительна к изменениям температуры. В богатых смесях, помимо линий Q-ветви, три изолированных линии S5, S6 и S7, относящиеся к чисто вращательным переходам молекул водорода, могут также быть использованы для определения температур в диапазоне 2000 – 3500 К. Процедура и точность определения температуры по двум линиям вращательных переходов водорода нами была детально исследована и представлена в работе [15]. В случае бедных смесей, когда молекулы водорода в газовой смеси отсутствуют, помимо спектров воды, могут быть использованы линии

На основе спектров, аналогичных представленным на рисунках 8 и 12, была получена качественная информация о временном поведении относительных концентраций исходных реагентов CH_4 и O_2 , а также основных продуктов сгорания H_2O , H_2 и CO_2 (рис. 13).

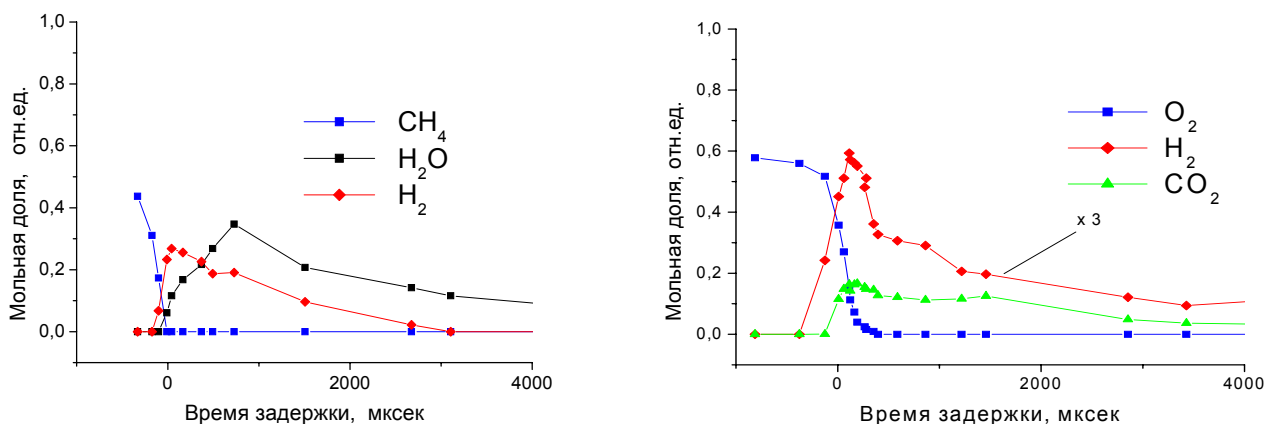


Рис. 13. Временное поведение относительных концентраций молекул CH_4 , H_2O и H_2 (слева) и O_2 , CO_2 и H_2 (справа), измеренных на основе КАРС спектров соответственно в областях 430 – 470 нм и 470 – 510 нм в импульсной горелке высокого давления при расходах O_2 – 12,4 г/с и CH_4 – 0,52 г/с

Наиболее характерным при горении богатых смесей является быстрое (на задержках – 200 – 0 мкс) разложение метана и появление продукта разложения – молекул водорода. При больших задержках (0 – 3000 мкс) в результате горения содержание водорода уменьшается и увеличивается концентрация молекул воды. При горении бедных смесей метан разлагается столь же быстро, однако концентрация водорода в результате горения находится ниже предела обнаружительной способности метода КАРС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена экспериментальная установка, включающая в себя компактную импульсную камеру сгорания смесей метана и водорода с кислородом, позволяющую получать продукты сгорания при высоких значениях температуры (до 3500 К) и давлениях (до 20 МПа). Для характеристики работы камеры сгорания и, в частности, для измерения температуры и качественного состава исходных веществ и продуктов сгорания нами использовался метод когерентного анти-Стоксова рассеяния света (КАРС). Полученные при таких условиях особенности спектров молекул, содержащихся в камере при различных режимах сгорания, позволяют сделать выбор наиболее предпочтительных из них для измерения температуры и состава. Одновременная регистрация спектров КАРС нескольких (CH_4 , H_2 , H_2O или O_2 , H_2 , CO_2) компонент за один лазерный импульс, синхронизованный с поджигом, позволила наблюдать временную эволюцию температуры и качественного состава смеси в камере сгорания.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Greenhalgh D.A.** In *Advances in Nonlinear Spectroscopy* (vol.15, ed. by Clark R.J.H. and Hester R.E., John Wiley & Sons, Chichester, 1988.

2. **Durst F., Melling Am Whitelaw J. H.** Principles and Practice of Laser Doppler Anemometry. London; New York; San Francisco: Academic Press, 1976. 405 p.
3. **Eckbreth A.C, Anderson T.J.** *AIAA paper 90-0158*, 1990.
4. **Berger . J.-P.** These de Doctorat, Universite de Bourgogne, Dijon, France, 1994.
5. **Theoretical and experimental studies of H₂ vibrational lines in high pressure and temperature mixtures / Michaut X., Berger J.-P., Saint-Loup et al.** // *Combustion Dans Les Moteurs Fuseses*, Toulouse, France, 2001.
6. **Clauss W., Klimenko D.N., Oschwald M. et al.** // *J. Raman Spectrosc.* **33**: 906, 2002.
7. **Vereschagin K.A., Vereschagin A.K., Smirnov V.V. et al.** // *J.Raman Spectr.* V39, 722-725, 2008.
8. **Prucker S., Meier W., and Stricker W.** *Rev.Sci.Instr.* 65, 2908, 1994.
9. <http://www.gaseq.co.uk>
10. **Grisch F., Pealat M.** // *J.RamanSpectrosc.* 25,145, 1994.
11. **Flaud J.M., Camy-Peyret C., Maillard J.P.** // *Mol.Phys.* 32, 499, 1976.
12. **Tennyson J., Zobov N.F., Williamson R. et al.** // *J.Phys.Chem.Ref.Data* 735, 2001.
13. **Vereschagin A.K., Smirnov V.V., Stel'makh O.M. et al.** // *J.Raman Spectr.* V41, p. 902-906, 2010.
14. **Herzberg G.** *Molecular spectra and molecular structure. Diatomic molecules*, New York, 1939.
15. **Clauss W., Kozlov D.N., Pykhov R.L. et. al.** // *Appl.Phys.B*, **B65**, No.4/5, 619-624, 1997.

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

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

CARS DIAGNOSTICS OF HIGH-PRESSURE HIGH-TEMPERATURE H₂/O₂ AND CH₄/O₂ FLAMES IN A PULSED COMBUSTION CHAMBER

In this work presented are the results of application of Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS) to the measurements of gas parameters in a pulsed combustion chamber specially designed for modeling of hydrogen- and hydrocarbon-oxygen combustion at high temperature (~3500 K) and pressure (~20 MPa). Besides temperature, pressure, and species relative concentration measurements together with temporal behavior, methodical aspects of CARS spectroscopy as a diagnostic tool were investigated from the point of view of proper choice of a probe molecule. Spectra evolution of selected probe molecules with pressure and temperature were analyzed.