

КАРС-диагностика процесса горения H_2-O_2 - и CH_4-O_2 -смесей при высоких температурах и давлениях

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

Представлены результаты применения метода спектроскопии когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) для диагностики параметров газовых продуктов сгорания водородного и углеводородного топлив с кислородом, находящихся при высоких температурах и давлениях. Проанализированы методические аспекты КАРС-термометрии, связанные с оптимальным выбором молекул (диагностических реперов) и с особенностями их спектров, зависящими от температуры и давления. Для моделирования горения в условиях, близких к существующим в реальных двигательных установках аэрокосмических аппаратов, использовалась специально сконструированная лабораторная камера сгорания, работающая в импульсно-периодическом режиме при высоких температурах (до 3500 К) и давлениях (до 20 МПа) продуктов сгорания.

Ключевые слова: КАРС-термометрия, углеводородное горение.

1. Введение

При изучении и оптимизации как самих процессов горения, так и камер сгорания в настоящее время часто используются лазерные бесконтактные невозмущающие методы, такие как лазерная индуцированная флюоресценция (ЛИФ) [1], лазерная анемометрия [2], когерентное антистоксово рассеяние света (КАРС) [3]. При этом следует отметить, что поскольку в этих методах используются спектры детектируемых молекул, атомов и радикалов, они требуют проведения исследований с целью получения дополнительных сведений об особенностях регистрируемых спектров, характерных для высоких температур и давлений. Анализ полученных данных позволяет выбрать наиболее предпочтительные из этих спектров для измерения температуры и других параметров газовых сред (пламён). Так, особенности КАРС-спектров 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].

Настоящая работа посвящена выяснению особенностей КАРС-спектров молекул – продуктов сгорания углеводородных топлив при высоких температурах – с целью установления наиболее информативных из них для КАРС-диагностики высокотемпературных реагирующих газовых смесей. Этот метод невозмущающей диагностики, обладающий высоким пространственным разрешением, является по сути единственным методом, позволяющим получать информацию о локальных значениях температуры и составе пламён в диапазонах давлений 0.1–10 МПа и температур 300–3500 К.

К.А.Верещагин, В.В.Смирнов, О.М.Стельмах, В.И.Фабелинский.
Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: veresch@kapella.gpi.ru, vvs@kapella.gpi.ru, stelmakh@kapella.gpi.ru, vif@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 2 ноября 2011 г.

Для тестирования диагностических методик и, в частности, КАРС, 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.

Нас интересовали как результаты измерения температуры и состава продуктов сгорания, так и методические аспекты КАРС-термометрии, связанные с оптимальным выбором молекул – диагностических реперов, и с особенностями их спектров, зависящими от температуры, давления и стехиометрии.

2. Экспериментальная установка

2.1. Система КАРС-диагностики

При выборе схемы КАРС-спектрометра мы исходили из следующих соображений. Импульсный режим работы и нестационарность условий в камере сгорания требуют, чтобы все необходимые измерения были выполнены в течение одного лазерного импульса с характерной длительностью ~10 нс, синхронизованного с циклом горения. При этом желательно регистрировать значительный фрагмент КАРС спектра (~300 cm^{-1}), в который попадают спектры нескольких молекул, например линии Q-ветви водорода и Q-ветви колебания ν_1 молекулы воды.

Отсюда следует необходимость применения схемы «широкополосного» КАРС (Broad-band CARS) [3], для реализации которой использовалось излучение двух лазеров: излучение накачки с узким спектром, которым являлось излучение второй гармоники YAG: Nd³⁺-лазера, и широкополосное излучение стоксова лазера на красителе. Разность частот излучения этих двух лазеров настраивалась в соответствии с комбинационными сдвигами частот спектров детектируемых молекул водорода и воды. При этом широкий спектр лазера на красителе позволял одновременно возбуждать и регистрировать переходы Q-ветвей

этих молекул за одну лазерную вспышку. Добавление еще одного стокового 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 стоковых лазеров использовалось излучение второй гармоники одночастотного (ширина спектра ~ 100 МГц) YAG: Nd^{3+} -лазера Infinity (Coherent Radiation). Типичная энергия излучения на длине волны 532 нм в импульсе длительностью 3 нс составляла 100 мДж и распределялась следующим образом: 10–15 мДж на «накачку» процесса КАРС, по 40 мДж на накачку каждого из стоковых лазеров. Все стоковые лазеры построены по схеме генератор–усилитель на растворах органических красителей (Pyridine, Rhodamin) в метаноле. Генератор стокового лазера «водородного канала» (для измерения температуры) представлял собой «безмодовый» осциллятор с поперечной накачкой, собранный по схеме двухпроходного усилителя с одним задним зеркалом. Излучение генератора усиливалось в однопроходном усилителе на красителе с поперечной накачкой. Его выходная энергия составляла ~ 3 мДж при ширине спектра более 500 см^{-1} . Для повышения пространственного разрешения применялась геометрия взаимодействия лазерных лучей «планарный КАРС» [3]. При этом пучок накачки и стоков пучков распространялись параллельно со сдвигом в пространстве приблизительно на 10 мм. При фокусировке этих пучков линзой ($f = 300$ мм) они пересекались в фокальной области под небольшим углом, что позволяло избежать генерации сигналов КАРС из областей, находящихся вне зондируемого объема. При работе с двумя стоковыми лазерами излучение второго лазера на красителе распространялось параллельно излучению первого на незначительном расстоянии от него.

Спектр КАРС регистрировался стробируемым с временем 10 нс многоканальным линейным фотоприемником (Scientific Instrument), расположенным в фокальной плоскости спектрографа (Jobin Yvon, THR1000) с фокусным расстоянием 1 м.

2.2. Импульсная камера сгорания высокого давления

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

Особенностью предлагаемой нами камеры сгорания является возможность получать продукты горения при высоких температурах и давлениях. При проектировании геометрия и размеры камеры выбирались из соображений экономичности и компактности в случае ее лабораторного использования. При этом применение методики КАРС позволяет выполнить условие, при котором диагностируемая область существенно меньше, чем объем камеры сгорания. При размере области перекрытия лазерных пучков $1 \times 0.1 \times 0.1$ мм соответствующий объем области зондирования составляет $\sim 10^{-5}\text{ см}^3$.

На рис.1 схематически представлена конструкция импульсной камеры сгорания высокого давления (ИКВД).

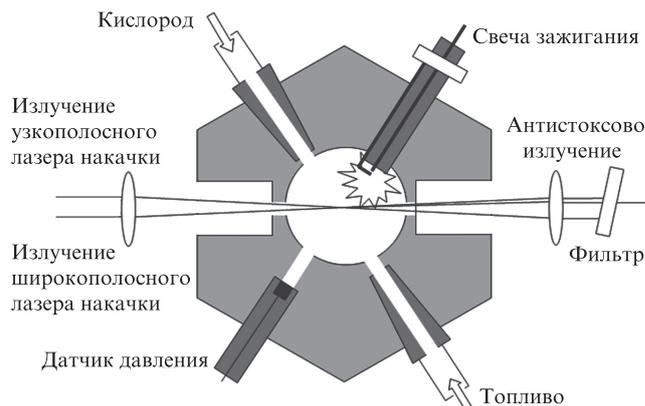


Рис.1. Импульсная камера сгорания высокого давления.

Камера изготовлена из жаропрочной нержавеющей стали и представляет собой цилиндр объемом $\sim 8\text{ см}^3$, в стенке которого имеются отверстия для патрубков двух импульсных клапанов системы напуска, для свечи поджига рабочей смеси и для датчика – измерителя давления. Для вывода продуктов сгорания и очистки камеры перед следующим рабочим циклом предусмотрены два соосных отверстия диаметрами ~ 1 мм, через которые также вводятся лазерные пучки и выводится излучение КАРС.

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, т.е. 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 6061B, вмонтированного в стенку камеры сгорания. На рис.2 представлена типичная форма импульса давления при горении метана, а также сигнал быстрого фотодиода, регистрирующего задержанный относительно момента поджига лазерный импульс. Для получения максимально возможных давлений продуктов сгорания нами были проведены измерения давления в зависимости от коэффициента избытка топлива Φ , результаты которых представлены на рис.3. Видно, что при начальных давлениях смеси метана с кислородом в камере 1.5 МПа

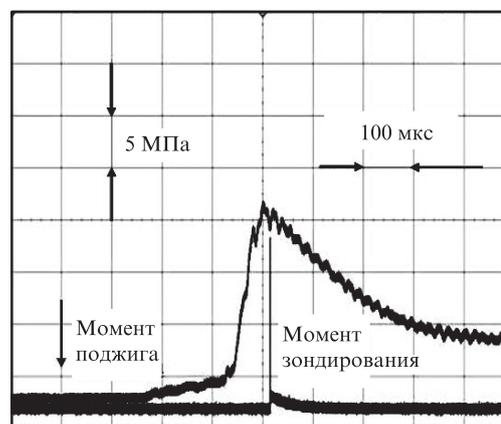


Рис.2. Формы импульсов давления при горении метана (верхний трек) и положение зондирующего лазерного импульса (нижний трек).

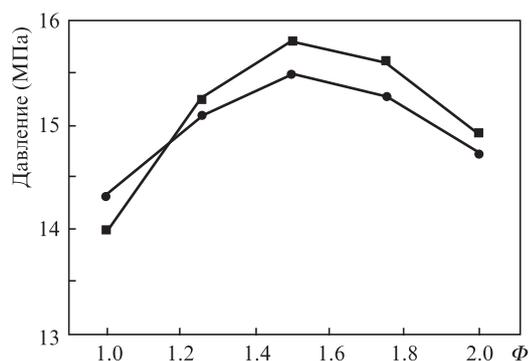


Рис.3. Амплитуда импульса давления в зависимости от коэффициента избытка топлива Φ при горении смеси $\text{CH}_4\text{-O}_2$ и начальном давлении 1.5 МПа: ■ – эксперимент, ● – расчет по программе GASEQ [9].

максимальное давление 15.8 МПа достигается при $\Phi = 1.5$. Для сравнения на рис.3 приведена кривая, полученная на основе расчета с использованием программы GASEQ [9] в приближении адиабатического горения. С целью оценки стабильности работы ИКВД анализировались эпюры давления для серии из 50 последовательных циклов, реализующихся при заданных расходах горючего и окислителя. Импульсы давления в различных циклах имели схожую форму, слегка отличаясь друг от друга как амплитудой, так и положением максимума во времени. Относительное стандартное отклонение для положений пиков составляло $\sim 4\%$, а для амплитуд – 5% – 6% .

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что сконструированная ИКВД обладает воспроизводимыми и контролируемыми параметрами и представляет собой удобный лабораторный инструмент для отработки диагностических методик.

Эксперимент выполнялся следующим образом. При работающей с частотой 1 Гц горелке устанавливались заданные начальные давления и значения массовых расходов в магистралях CH_4 и O_2 . Длина волны излучения первого стоксова лазера настраивалась на частоту комбинационного сдвига линий выбранных молекул, например Q-ветви водорода и воды, а длина волны излучения другого лазера выбиралась такой, чтобы она перекрывалась 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, содержащих информацию о спектрах КАРС и давлениях в камере сгорания.

3. Результаты

Обычно при КАРС-диагностике горения информация о температуре и плотности в исследуемой среде извлекается из регистрируемых в зондируемом объеме внутри камеры сгорания спектров КАРС-переходов молекул, выбранных в качестве репера. При этом температура и плотность могут определяться по наилучшему совпадению экспериментальных и теоретических спектров, рассчитанных с некоторым шагом по значениям регистрируемых параметров. Точность их определения зависит как от качества экспериментальных данных, так и от корректности модели, используемой для расчета КАРС-спектров, от надежности спектроскопической информации о

сечениях переходов выбранных молекул – реперов, их частотах и ширинах контуров используемых линий спектра. Так, для измерения температуры при горении богатых кислородно-водородных и углеводородных смесей удобно использовать вращательно-колебательные спектры Q-ветви молекулы водорода, спектроскопические константы которой известны с хорошей точностью.

Одной из задач настоящей работы являлось выяснение возможностей КАРС-термометрии газовых смесей при высоких температурах и давлениях, а также работы с бедными смесями, где в качестве репера могут быть использованы другие молекулы – продукты сгорания, например, молекулы воды. При этом следует отметить, что реализация широкополосной схемы КАРС с одновременной регистрацией спектров водорода и воды за время одного лазерного импульса существенно увеличивает информативность диагностики, позволяя судить о полноте сгорания, а также о температуре при исследовании нестационарных турбулентных пламен с сильно меняющейся локальной стехиометрией. На рис.4 приведены полученные при горении $\text{H}_2\text{-O}_2$ -смеси спектры КАРС, содержащие одновременно регистрируемые линии переходов молекул воды и водорода.

При определении температуры по интенсивностям линий Q-ветви колебательно-вращательных переходов водорода нами принималась во внимание зависимость от вращательного квантового числа J их уширения, обусловленного столкновениями с молекулами воды. Это влияние является определяющим, поскольку вода составляет 40% – 50% от общего состава продуктов сгорания и сечения уширения линий водорода водой в несколько раз превышают соответствующие сечения уширения другими молекулами в продуктах сгорания. В расчетах использовались исследованные ранее температурные изменения этой зависимости в диапазонах $300\text{--}1800\text{ К}$ [4, 5] и $2000\text{--}3500\text{ К}$ [6, 7]. На рис.5 приведен результат определения температуры на основе описанной процедуры с наилучшим совпадением экспериментального и расчетного спектров при $T = 3400\text{ К}$. Ошибка определения температуры, измеренной за один лазерный импульс, составляла 4% . Как отмечалось выше, в случае диагностики горения бедных смесей или локального выгорания водорода для определения температуры могут быть использованы линии переходов Q-ветви колебания ν_1 молекул воды. В силу существенно меньших значений вращательной постоянной и константы колебательно-вращательного взаимодействия у молекул воды, их КАРС-спектр отличается от спек-

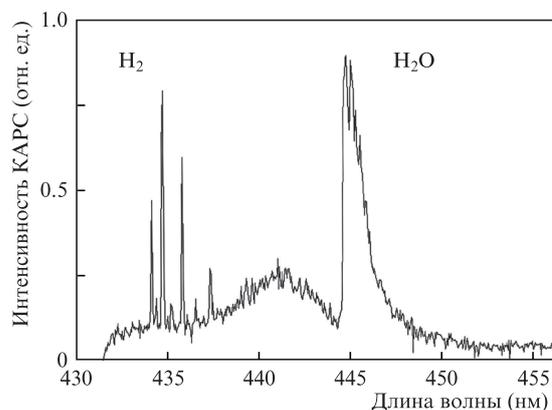


Рис.4. Фрагмент КАРС-спектра, содержащий линии переходов Q-ветви молекул водорода и Q-ветви колебания ν_1 молекул воды.

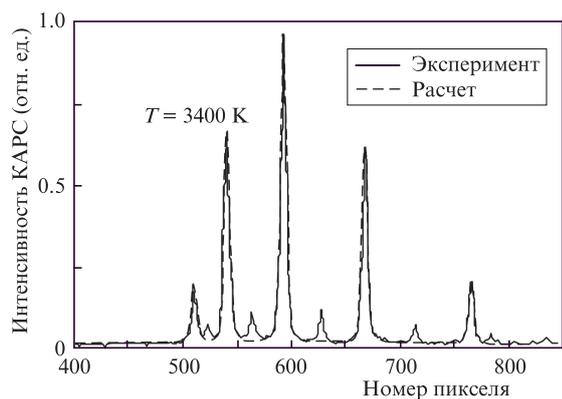


Рис.5. Иллюстрация процедуры подгонки экспериментального и расчетного (учитываются только линии с нечетными номерами J) спектров КАРС Q-ветви молекул водорода.

тра водорода большим количеством линии и их существенным перекрытием. Это приводит к тому, что спектр воды при давлениях смеси свыше 0.1 МПа представляет собой неразрешаемый контур, и для определения температуры используется изменяющаяся с температурой и плотностью форма его огибающей (рис.6).

Исходя из имеющихся данных о положениях линий воды и особенностях их уширения [10–12], была создана программа расчета спектра Q-ветви колебания v_1 , с помощью которой была рассчитана библиотека спектров. Одним из параметров таких спектров является температура, определение которой осуществляется на основе процедуры подгонки расчетных спектров к экспериментальным по критерию наилучшего совпадения их формы. На рис.6 представлен результат такой процедуры, которая дает значения температуры в области 2000 К с точностью $\sim 6\%$.

При горении смеси CH_4-O_2 было исследовано временное поведение основных газовых параметров – температуры и относительных концентраций продуктов сгорания как на стадии развития горения, так и при их истечении из камеры сгорания. Для этого с задержкой во времени относительно импульса поджига регистрировались спектры КАРС в двух спектральных областях (рис.7). В первой области (430–470 нм) расположены спектры молекул CH_4 , H_2 и H_2O , регистрируемые одновременно за каждую лазерную вспышку. Наблюдаемые особенности полученных спектров позволяют сделать выводы о возможности использовании некоторых из перечисленных молекул – продуктов сгорания – в качестве реперов для термометрии при применении КАРС-спектроскопии для диагно-

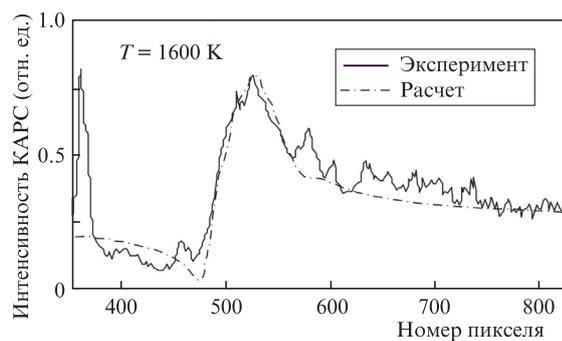


Рис.6. Иллюстрация процедуры подгонки экспериментального и расчетного спектров КАРС Q-ветви колебания v_1 молекул воды.

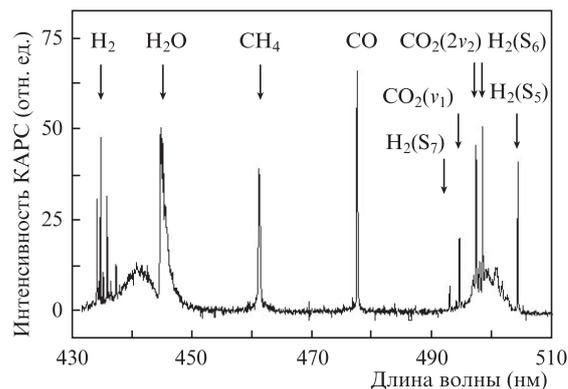


Рис.7. Обзорный КАРС-спектр молекул, регистрируемых в камере сгорания CH_4-O_2 -смеси.

стики процесса горения CH_4-O_2 -смесей. На рис 8 приведена серия спектров, регистрируемых в первой области, в зависимости от времени задержки момента КАРС-зондирования относительно фронта импульса давления.

Анализ полученных спектров указывает на ряд особенностей развития процесса горения. Так, видно, что уже на временах, соответствующих фронту импульса давления, происходит заметное разложение метана и появление молекул водорода. Ввиду того, что молекулы метана подвержены интенсивному разложению при температурах выше 1500 К, спектры молекул метана при больших температурах не могут быть использованы для термометрии. Интенсивности линий спектров водорода на порядок превышают интенсивности линий воды, поскольку при высоких температурах (2000–3000 К) статистическая сумма по вращательным переходам молекулы воды существенно превосходит соответствующую статистическую сумму в случае водорода. Тем не менее спектры как водорода, так и воды могут быть пригодны для термометрии, а также для оценки качественных характеристик процесса горения (смешение, полнота сгорания). На основе полученных КАРС-спектров водорода в этой области определялась зависимость температуры в импульсной камере сгорания от задержки момента зондирования относительно момента поджига. Это позволило сопоставить временное поведение давления и температуры как в фазе горения, так и в процессе истечения горячих продуктов сгорания (рис.9). Здесь необходимо отметить, что процедура измерения температуры, реализованная выше для H_2-O_2 -пламени и учитывающая данные о температурной зависимости уширения различных линий водорода водой, не является корректной, т. к. помимо воды (в случае горения водорода) в столкновениях с водородом участвуют и другие молекулы – продукты горения метана. Поэтому для измерения температуры была использована модифицированная схема КАРС-спектрометра, описанная в работе [13], которая позволяет одновременно регистрировать не только интенсивности линий Q-ветви водорода, но и их ширины.

Во второй спектральной области (470–510 нм), представленной на рис.7, находятся спектры чисто вращательных переходов молекул водорода с $J = 5, 6$ и 7 (Q-ветвь перехода молекул O_2) и колебательно-вращательных полос v_1 и $2v_2$ молекул CO_2 (а также их «горячих» переходов). Для иллюстрации особенностей спектров, соответствующих различным режимам горения, на рис.10 представлены фрагменты КАРС-спектров, каждый из которых

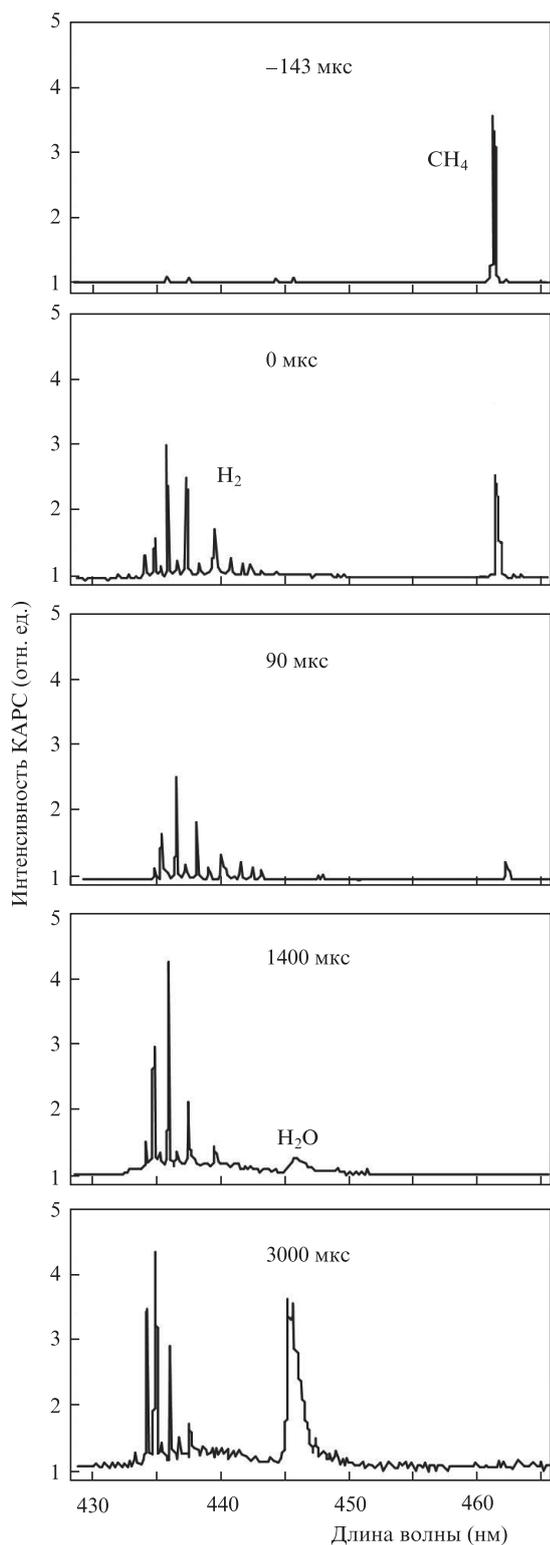


Рис.8. Серия КАРС-спектров молекул CH_4 , H_2 и H_2O , регистрируемых в области 430 – 470 нм, при различных временах задержки относительно фронта импульса давления.

получен 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 уменьшение содержания кислорода и появление продукта – молекул CO_2 . Фрагмент 3 снят также в бедной смеси при задержке 4000

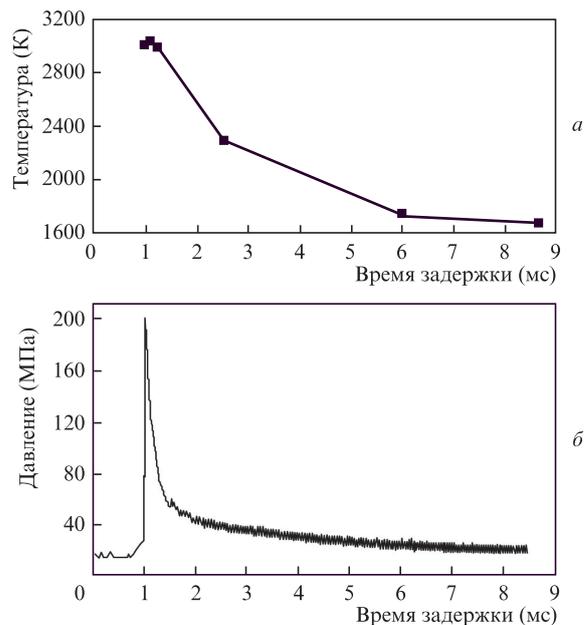


Рис.9. Временные зависимости температуры (а) и давления (б), измеренные в камере сгорания. Время отсчитывается относительно импульса поджига.

мкс и указывает на полное сгорание кислорода и наличие продукта – CO_2 . Видно, что 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 S_6 и S_7 молекул водорода. Как уже отмечалось, водород, как продукт разложения метана, при горении богатых смесей появляется уже в фазе горения, соответствующей фронту импульса давления, о чем свидетельствует спектр, снятый при задержке 10 мкс и представленный на фрагменте 5. Характеризуя особенности спектров молекул O_2 , H_2 , CO и CO_2 , регистрируемых во второй спектральной области и представленных на рис.7 и 10, можно сделать следующие выводы об их использовании в задачах КАРС-термометрии углеводородно-кислородных пламен. Прежде всего необходимо отметить, что проводимый нами ниже анализ предусматривает решение задач экспресс-термометрии (измерения за один лазерный импульс) с регистрацией широкополосного спектра, содержащего полосы как минимум двух молекул, и с использованием наиболее широко применяемой в экспериментах регистрирующей аппаратуры, а именно спектрографа с фокусным расстоянием 1 м, решеткой 2400 штр./мм и аппаратной функцией $\sim 0.9 \text{ см}^{-1}$ (в нашем случае это THR-1000 фирмы Jobin Ivon) в сочетании с линейным многоканальным фотоприемником. Спектры Q-ветви молекул O_2 , имеющие характерное расстояние между наиболее интенсивными линиями 0.5 см^{-1} [14], не будут разрешаться даже при низких давлениях, и форма контура, искаженная аппаратной функцией, будет слабочувствительна к изменениям температуры. В богатых смесях, помимо линий Q-ветви водорода, три изолированные линии – S_5 , S_6 и S_7 , 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

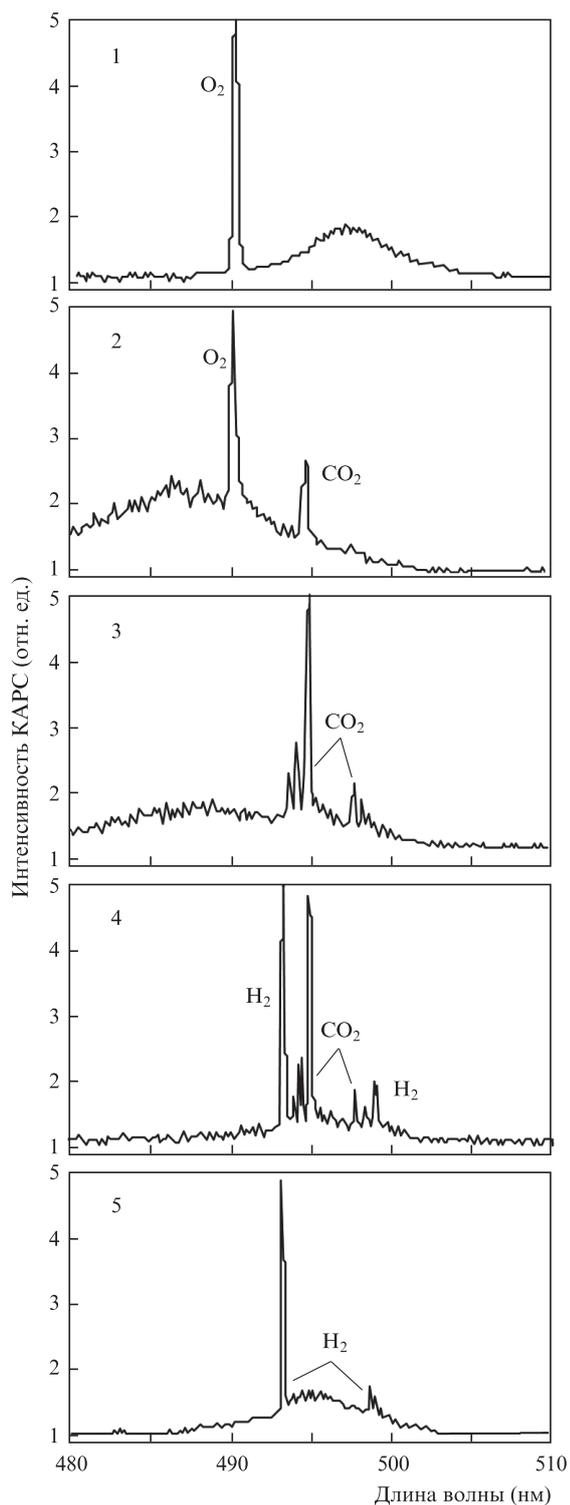


Рис.10. Фрагменты спектров КАРС-молекул O_2 , H_2 и CO_2 , полученные при различных значениях избытков топлива и задержках момента регистрации относительно импульса поджига.

водорода была нами 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 полос ν_1 и $2\nu_2$ и «горячих» переходов молекул CO_2 .

На основе аналогичных представленным на рис.7 и 10 КАРС-спектров с одновременной регистрацией (за длительность одного лазерного импульса) трех молекуляр-

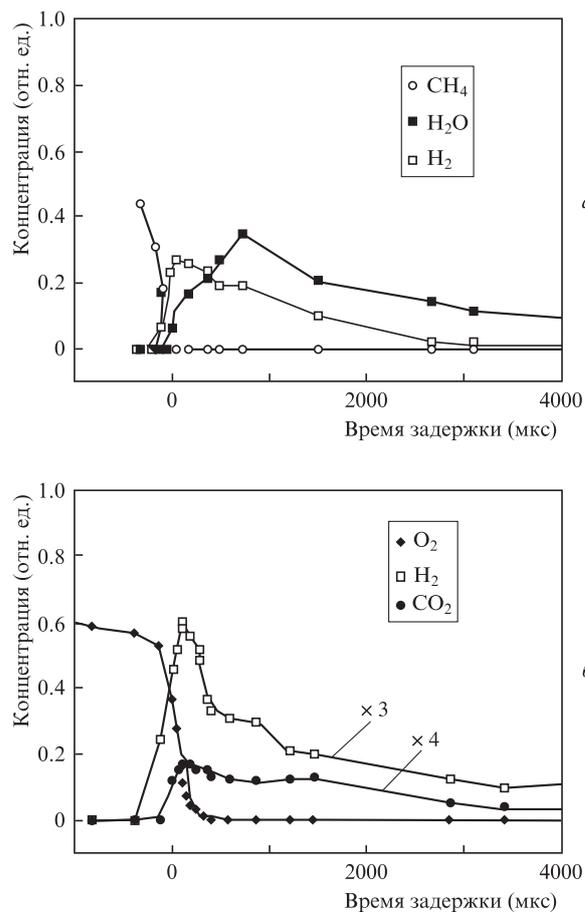


Рис.11. Временные зависимости относительных концентраций молекул CH_4 , H_2O и H_2 (а) и O_2 , CO_2 и H_2 (б), измеренных на основе КАРС-спектров в областях 430–470 и 470–510 нм соответственно в импульсной горелке высокого давления при массовых расходах 1.24 г/с (O_2) и 0.52 г/с (CH_4). Время отсчитывается относительно фронта импульса давления.

ных компонент 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.11). Наиболее характерным при горении богатых смесей является быстрое (при задержках 0–10 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.

4. Заключение

В работе представлены результаты экспериментов по диагностике горения H_2-O_2 - и CH_4-O_2 -смесей. Для измерения температуры и определения качественного состава исходных веществ и продуктов сгорания нами использовался метод КАРС с одновременной регистрацией за длительность одного лазерного импульса (~ 10 нс) спектров нескольких молекулярных компонент. Измерения проводились в компактной импульсной камере сгорания, позволяющей получать продукты сгорания при высоких температурах (до 3500 К) и давлениях (до 20 МПа),

характерных для реальных камер сгорания двигательных установок аэрокосмических аппаратов. Полученные в таких условиях особенности спектров молекул, содержащихся в камере при различных режимах сгорания, позволяют сделать выбор наиболее предпочтительных из них для измерения температуры и состава смеси. 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 импульсом поджига, позволила наблюдать временную эволюцию температуры и состава смеси в камере сгорания.

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

1. Greenhalgh D.A., in *Advances in Nonlinear Spectroscopy*. Ed. by R.J.H.Clark, R.E.Hester (Chichester: John Wiley & Sons, 1988, pp 193–225).
2. Durst F., Melling Am Whitelaw J. H. *Principles and Practice of Laser–Doppler Anemometry* (London, New York, San Francisco: Acad. Press, 1976, p. 405).
3. Eckbreth A.C., Anderson T.J. *AIAA paper 90-0158* (1990).
4. Berger J.-P. These de Doctorat (Dijon, France, Universite de Bourgogne, 1994).
5. Michaut X., Berger J.-P., Saint-Loup R., Chaussard F., Berger H. *Theoretical and Experimental Studies of H_2 Vibrational Lines in High Pressure and Temperature Mixtures. Actes du Colloque. Combustion Dans Les Moteurs Fusees* (Toulouse, France, 2001, p. 321–331).
6. Clauss W., Klimenko D.N., Oswald M., Vereschagin K.A., Smirnov V.V., Stelmakh O.M., Fabelinsky V.I. *J. Raman Spectrosc.*, **33**, 906 (2002).
7. Vereschagin K.A., Vereschagin A.K., Smirnov V.V., Stel'makh O.M., Fabelinsky V.I., Clauss W., Oswald M. *J. Raman Spectrosc.*, **39**, 722 (2008).
8. Prucker S., Meier W., Stricker W. *Rev. Sci. Instr.*, **65**, 2908 (1994).
9. <http://www.gaseq.co.uk>.
10. Grisch F., Pealat M. *J. Raman Spectrosc.*, **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., Polyansky O.L., Bernath P.F. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, **30**, 735 (2001).
13. Vereschagin A.K., Smirnov V.V., Stel'makh O.M., Fabelinsky V.I., Clauss W., Oswald M. *J. Raman Spectrosc.*, **41**, 902 (2010).
14. Герцберг Г. *Спектры и строение двухатомных молекул*. Под ред. В.Н.Кондратьева (М.: ИЛ, 1949).