

ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОГО ПОТОКА

А.Ф.Рожков,И.В.Сенюев

Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е.Жуковского

Необходимость измерения температуры в потоке газа.

Создание перспективных летательных аппаратов (ЛА) различного назначения для полетов в земной атмосфере с гиперзвуковыми скоростями во многом определяется развитием и созданием новых двигательных установок (ДУ), обладающих высокими тягово-экономическими характеристиками в широком диапазоне чисел M полета. Одной из перспективных схем таких ДУ могут быть гиперзвуковые прямоточные реактивные двигатели (ГПВРД), работающие на водородном или углеводородных топливах.

Одной из проблем, стоящих при создании ГПВРД является осуществление высокоэффективного рабочего процесса в тракте двигателя во всем диапазоне чисел M . Для этого необходима отработка на стенде камер сгорания с моделированием на входе в ГПВРД давления, температуры торможения, чисел M, Re и содержания весовой доли свободного кислорода в потоке (23%).

Требуются измерения давления, температуры, концентрации и состава смеси, температура которой может достигать $2500^{\circ}K$. Единственным методом этих измерений является оптический метод, в частности – метод адсорбционной спектроскопии.

Адсорбционный спектрометр. Принцип работы. Конструкция

Адсорбционная спектроскопия анализирует спектры поглощения зондирующего среду электромагнитного излучения. Интенсивность излучения при его прохождении через исследуемую среду уменьшается вследствие превращения энергии излучения в различные формы внутренней энергии вещества и (или) в энергию вторичного излучения.

В настоящее время в адсорбционной спектроскопии источником зондирующего излучения являются диодные лазеры, поэтому метод получил название диодной лазерной адсорбционной спектроскопии (ДЛАС). Применение ДЛАС-спектроскопии для диагностики процессов горения в условиях повышенных температур ($> 1500 K$) и давлений ($> 1 \text{ атм}$) сопряжено с рядом дополнительных трудностей. Значительное уширение линий поглощения в указанных условиях практически исключает возможность использования одного диодного лазера (ДЛ), допускающего сканирование по частоте в относительно узком спектральном интервале ($1.5 - 2 \text{ см}^{-1}$). В этих условиях радикальным решением является использование двух ДЛ, настроенных на сильные линии в различных спектральных «окнах». В опытном образце, созданном Институтом Спектроскопии

Российской Академии Наук (ИСАН) по техническому заданию ЦАГИ использовались два ДЛ, генерирующие излучение в диапазоне 1.392 мкм и 1.343 мкм.

В 2014 г. проводилось испытание опытного образца в лабораторных условиях. Была изготовлена кювета, выдерживающая температуру газа до 1200 К и давление до 3 атм. Для отработки работы ДЛАС использовалось также пламя щелевой горелки.

По результатам этих лабораторных испытаний макета как ДЛАС, как и его программное обеспечение были модернизированы.

Излучение от двух лазеров, работающих в импульсном режиме, должно объединяться в одном оптоволоконном световоде, а затем разделяться на два канала - сигнальный и референтный. В лабораторной версии прибора свет от двух лазеров сначала объединялся в общий световод, затем передавался по протяженной линии, и наконец, разделялся на два канала непосредственно перед измерительной камерой. Для объединения и для разветвления использовались одинаковые трехвыводные оптоволоконные мультиплексоры. В модернизированном приборе объединение и разветвление происходит в одном четырехвыводном мультиплексоре, который помещен внутри корпуса прибора. Такая схема позволяет защитить хрупкие оптические детали от повреждений и уменьшить количество оптоволоконных соединителей, а также ослабить влияние акустических вибраций, к которым особенно чувствительны как раз соединители и мультиплексоры. Окончательная схема оптоволоконных коммуникаций приведена на рисунке 1.

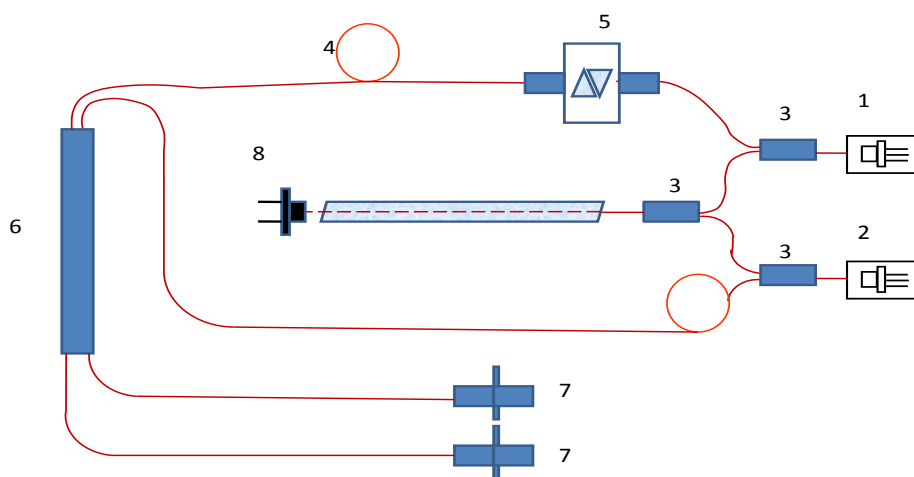


Рисунок 1- Схема разводки оптоволоконных цепей внутри прибора. 1,2 - диодные лазеры, 3 - трехвыводной оптоволоконный мультиплексор, 4 - два оптоволоконных световода, 5 - регулируемый оптоволоконный аттенюатор, 6 - четырехвыводной

оптоволоконный мультиплексор, 7 - оптоволоконные разъемы на панели прибора, 8 - фотодиод системы стабилизации линий.

Используемые лазеры несколько различаются по мощности. Кроме того, коэффициент деления оптоволоконного мультиплексора зависит от длины волны. По этим причинам сигналы на выходе фотодетектора для длин волн 1.39 мкм и 1.41 мкм различались почти на 40 %, что приводило к некорректной работе схемы выделения сигнала поглощения в фотоприемном устройстве. Для выравнивания сигналов интенсивность излучения более мощного лазера уменьшалась с помощью оптоволоконного перестраиваемого аттенюатора.

Одномодовые световоды для транспорта сигнального и референтного излучения ДЛ к тестовой камере имели длину 30 метров. Эти световоды имеют усиленную пластифицированную защитную оболочку толщиной 3 мм. Вместе с резервным световодом такой же длины вся сборка помещалась в полиэтиленовую гофрированную трубку и в таком виде протягивалась из аппаратной в помещение со стендом.

При измерениях в реальных условиях силовой установки на стенде ЦАГИ серьезной проблемой может быть засветка фотоприемников широкополосным излучением горячих частей установки, а также значительное ослабление интенсивности зондирующего лазерного излучения, не обусловленное резонансным поглощением молекул воды (рассеяние на несгоревших частицах топлива, уменьшение пропускания оптических окон и т.д.). Для компенсации этих нерезонансных потерь была разработана новая электронная система компенсации неселективных потерь. Идея такой компенсации основана на импульсном режиме работы ДЛ. Оба лазера работают в импульсном режиме поочередно, и в промежутке между импульсами существует интервал времени, когда ни один из лазеров не работает. В течение этого интервала на сигнальный фотодиод поступает только фоновое излучение, измеряя которое можно сформировать компенсирующий сигнал. Затем этот сигнал запоминается и поддерживается постоянным до окончания лазерного импульса, после чего на следующем интервале с неработающими лазерами снова формируется сигнал компенсации.

Описанная система позволяет избежать перегрузок измерительных каналов при значительных вариациях интенсивности аналитических линий и поддерживать нулевую базовую линию даже при ослаблении интенсивности света, проходящего через измерительную камеру, более чем на порядок (например, вследствие помутнения окон из-за осаждения сажи).

По результатам лабораторных испытаний в 2014 г., в ИСАНе были существенно доработаны программы управления лазерами, отображения результатов измерений и обработки результатов измерений. Были разработаны инструкция по работе с программой управления СУ-ООС и описание программы вычисления температуры, концентрации и давления TPC Fit.11b.

Вид экрана ПК при работе с программой TPC Fit.11b приведен на рисунке 2.

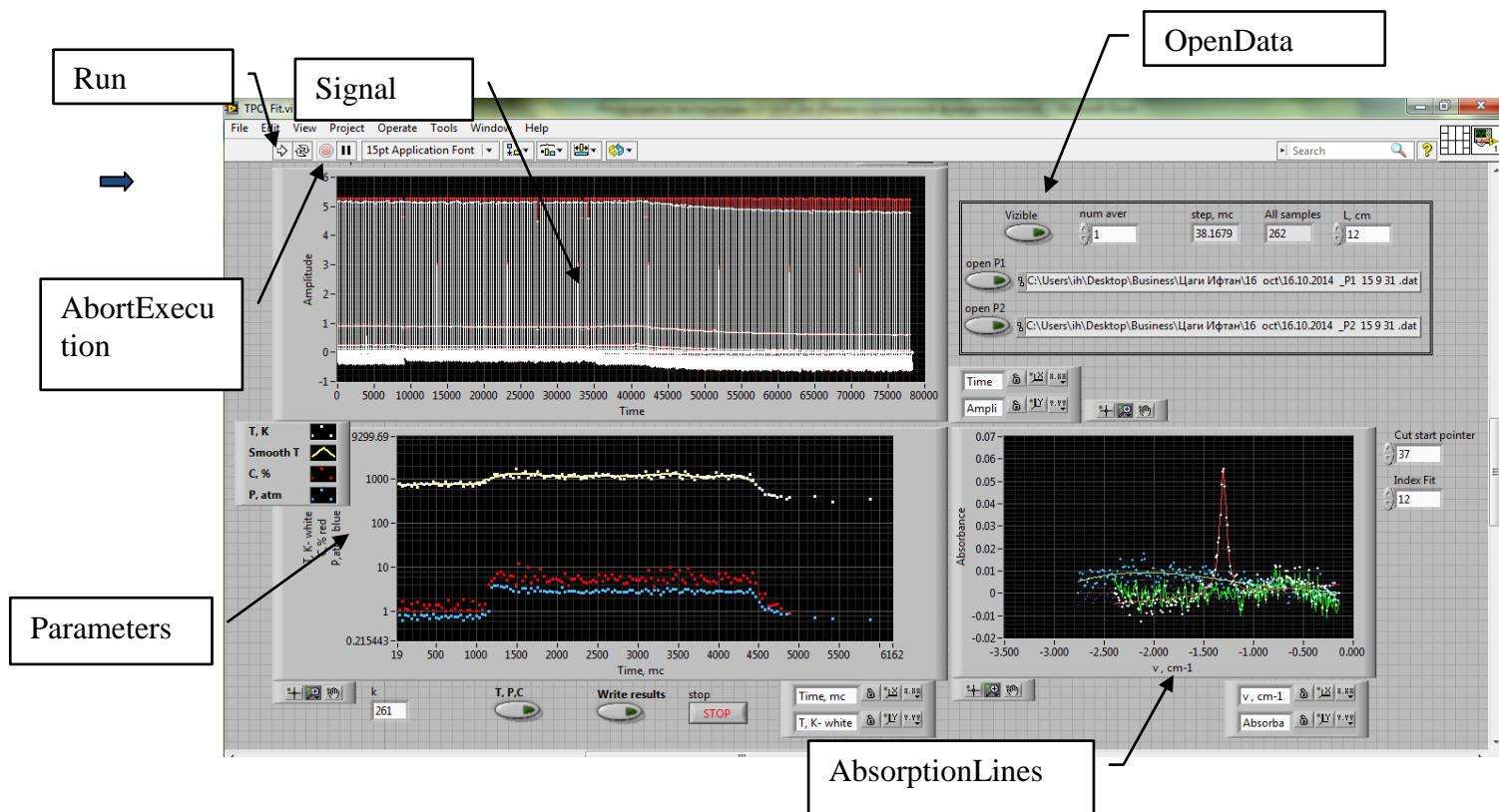


Рисунок 2 - Вид экрана монитора при работе с программой TPC Fit.11b

В верхнем левом окне “Signal” приведены записи всех сканов диодных лазеров, зарегистрированных за время измерения в одном пуске. Фрагмент этой полной записи, содержащий 6 полных сканов, в большем масштабе приведен на рисунке 3.

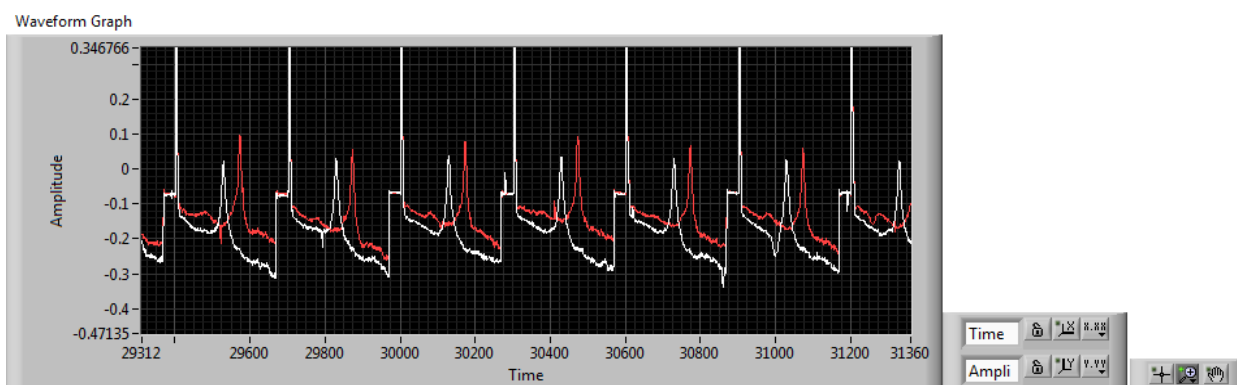


Рисунок 3 - Фрагмент полной записи с 6-ю сканами

На рисунке 3 видны 2 сильные линии поглощения в области перестройки двух лазеров - белым цветом представлен участок спектра в окрестности 1.392 мкм (DL1), красным – участок спектра в окрестности 1.343 мкм (DL2). Четко виден линейный (в первом приближении) характер изменения интенсивности ДЛ, обусловленный линейным изменением тока инжекции лазера. На этом фоне регистрируется импульс изменения интенсивности проходящего через среду лазерного излучения в тот момент, когда длина волны ДЛ совпадает с длиной волны поглощения паров воды. Текущий вид линий поглощения, регистрируемых в процессе измерений, отображается в правом нижнем окне рисунка 2 - “AbsorptionLines”.

Температура среды определяется по отношению интегральных интенсивностей линий поглощения. Экспериментальные линии поглощения подгоняются стандартными контурами (Фойгт или Раутиан-Собельман). Пример такой подгонки приведен на рисунке 4.

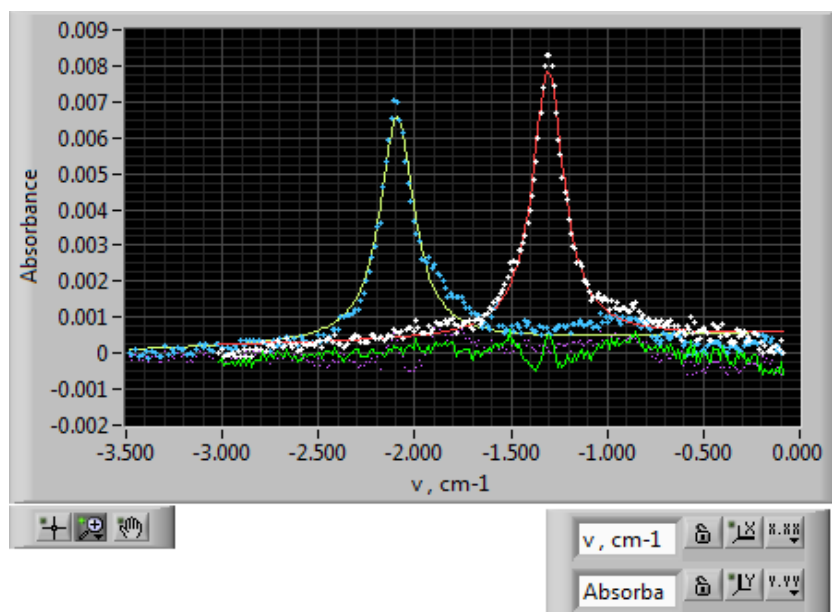


Рисунок 4 - Подгонка зарегистрированных линий воды модельными функциями

Напомним, что определение температуры не зависит от концентрации воды и давления газа в тестируемом объекте, поскольку определяется из отношения интегральных интенсивностей двух линий. Концентрация паров воды определяется по абсолютной величине интегрального поглощения при известной длине оптического пути в камере. Давление газовой смеси определяется по лоренцовой части контура.

При обработке в программу заранее вводятся табличные параметры уширения линий воды за счет столкновений с молекулами воздуха и резонансного самоуширения. Необходимо отметить, что точность определения давления смеси существенно зависит от параметров уширения линий основными компонентами газовой смеси. Эти параметры приведены в базах данных типа HITRAN для некоторых случаев, например, уширение некоторых линий воды с низколежащих нижних уровней при столкновениях вода-воздух, вода-вода, и т.п. Параметры уширения для линий с высоколежащих уровней являются результатом расчетов, в результате чего точность этих параметров не гарантируется и сильно меняется в базах за разные года. Уширение линий воды углеводородными компонентами горения вообще не включены в современные базы данных и для их получения требуются специально поставленные экспериментальные измерения в строго контролируемых лабораторных условиях. Ввиду этих принципиальных причин нельзя рассчитывать на точное измерение давления смеси методом ДЛАС в условиях сжигания углеводородного топлива.

Результаты быстрой квази-on-line обработки программой TPC Fit.11b (температура, давление, концентрация молекул воды) отображаются в левом нижнем окне - "Parameters" (рисунок 2). Термин квази-on-line указывает на то, что для получения результатов измерений оператору надо активировать программу обработки и указать имена файлов с экспериментальными данными, которые программа должна обработать. После этого программа выдает результаты практически в реальном времени. В дальнейшем будем называть эту программу – «быстрой обработкой» (БО).

Как и ранее, определение параметров T , C , P проводилось также по разработанной программе в среде Matlab, которая не столь автоматизирована и требует большего времени обработки. В дальнейшем будем называть этот режим – «ручной обработкой» (РО). В процессе испытаний опытного образца использовались оба режима обработки и сравнивались их результаты.

Тестирование макета проводилось с использованием описанной выше кюветы. К сожалению, в реальных экспериментах кювета не выдерживала длительного нагрева при

температурах выше 1000 К, поэтому эксперименты проводились при меньших температурах – 600 и 900 К и давлениях, равных 1, 2 и 3 атм. В экспериментах давление в рабочем объеме измерялось механическим манометром (МТИ-3) и термопарой.

В Таблице 1 приведены итоговые результаты обработки по РО программе. Видно, что результаты вполне удовлетворительные и самое главное - система дает правильное значение температуры при значительном изменении давления, а, следовательно, и ширины линий поглощения.

Таблица 1. Результаты сравнения показаний термопары и ДЛАС-спектрометра

Данные по датчикам	T, К	$\Delta T/T$
1атм T=596К	610	2%
2атм T=590К	615	4,2%
3атм T=605К	614	1,5%
1атм T=885К	931	5,2%
2атм T=901К	970	7,7%
3атм T=913К	944	3,4%

1) Испытания в лабораторных условиях ЦАГИ.

В ЦАГИ были проведены испытания доработанного ДЛАС в лабораторных условиях (Рисунок 5).



Рисунок 5 Доработанный ДЛАС

Для удобства настройки спектрометра были изменены его механические узлы крепления. Предварительные испытания показали необходимость изоляции измерительного объёма от паров воды, находящейся в окружающем воздухе. В настоящее время проводятся доработки конструкции с целью исключения влияния окружающего воздуха на измерения.

ВЫВОДЫ:

- 1) Испытания показали высокую эффективность абсорбционного спектрометра. Погрешность измерений составляет не более 7,7%.
- 2) Модернизирована программа обработки для расчета концентрации и температуры в среде.
- 3) Доработана конструкция ДЛАС для адаптации спектрометра к различным условиям эксперимента.

Список литературы:

1. Ефимов Б.Г., Иншаков С.И., Климов А.М., Скворцов В.В. Исследование структуры зоны плазмохимических реакций за экраном в сверхзвуковом потоке при инъекции керосина и пропана под экран в присутствии неравновесного разряда //ТВТ.2010. Т.48, №2, с. 169-174.
2. Скворцов В.В. Экспериментальные исследования ряда схем неравновесных электронных разрядов для воспламенения и стабилизации горения в сверхзвуковых потоках //Ученые записки ЦАГИ.2011. Т.42, №3, с. 3-24.
3. Алферов В.И., Бушмин А.С. электрический разряд в сверхзвуковом потоке воздуха //ЖЭТФ.1963. Т.44, вып.6, с.1775.