

УДК 533; 543.422

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ МЕТОДОМ ДИОДНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОСКОПИИ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР И ДАВЛЕНИЙ

© 2018 г. В. В. Лигер¹, Ю. А. Курицын¹, В. Р. Мироненко¹, М. А. Большов^{1*},
Я. Я. Понуровский², О. М. Колесников³

¹Институт спектроскопии РАН, Москва, Россия

²Институт общей физики РАН им. А.М. Прохорова, Москва, Россия

³Центральный аэрогидродинамический институт им. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Россия

*E-mail: bolshov@isan.troitsk.ru

Поступила в редакцию 24.09.2015 г.

Разработан макет абсорбционного спектрометра с диодными лазерами для бесконтактного измерения температуры и концентрации паров воды в газовых потоках при давлениях смеси до 3 атм и температурах 300–2000 К. Методика основана на быстрой перестройке длины волны излучения двух лазеров, регистрации линий поглощения молекул воды, расположенных в диапазоне перестройки, и подгонке экспериментальных спектров поглощения теоретическими, симулированными с использованием спектроскопических баз данных. В статье описаны оригинальные узлы спектрометра и различные алгоритмы обработки экспериментальных спектров. Работоспособность спектрометра и методик обработки проверена в лабораторных испытаниях с кюветой при давлении 1 атм и температуре 300–1500 К. Различные варианты обработки дают разумное совпадение данных о параметрах среды, полученных методом диодной лазерной абсорбционной спектрометрии и измеренных стандартными датчиками температуры. Разработанный макет спектрометра прошел первые испытания на опытном стенде Т-131 в ЦАГИ.

DOI: 10.7868/S004036441801012X

ВВЕДЕНИЕ

Современные задачи аэротермохимии, включая рабочие процессы в энергетических установках и воздушно-реактивных двигателях, работающих на химическом топливе, становятся все более сложными. Так, обеспечение стабилизации и эффективности процессов горения при все более возрастающих скоростях полета требует детальных исследований физико-химических процессов горения в сверхзвуковых потоках. Здесь традиционные контактные методы, основанные на введении в газовый поток измерительных зондов, становятся малоприменимыми. В условиях высокой температуры вводимые зонды нуждаются в адекватной системе охлаждения, что неизбежно приводит к увеличению их размеров и, соответственно, к недопустимому искажению потока. Диагностика эффективности работы двигателя, основанная на анализе химического состава забираемых проб газа, также проблематична, поскольку требует эффективной системы охлаждения для замораживания реакций в забираемых пробах. В этой ситуации большие надежды возлагаются на методы лазерной

спектрометрии, обеспечивающие бесконтактную диагностику непосредственно в зонах горения.

При исследовании процессов горения, происходящих в пламенах или в многокомпонентных газовых потоках, широко используются методы спектроскопии с диодными лазерами (ДЛ). В силу относительной простоты и высокой чувствительности при детектировании атомов и молекул особенное развитие получил метод абсорбционной спектроскопии с ДЛ – диодная лазерная абсорбционная спектрометрия (ДЛАС) [1–5]. Успешное развитие метода ДЛАС позволило перейти от лабораторных испытаний к созданию аппаратуры для измерения параметров газовых потоков в реальных силовых установках [6, 7].

В случае диагностики газовой среды методом ДЛАС обычно зондируются простые молекулы, ширины линий поглощения которых при низких полных давлениях среды (<1 атм) достаточно малы, и, как правило, удается выбрать либо изолированные, либо слабо перекрывающиеся линии тестовой молекулы. В качестве тестовых используются либо молекулы, естественным образом возникающие

в исследуемом объеме (H_2O , CO_2 , CO , C_nH_m), либо атомы или молекулы, добавляемые искусственно как маркеры. Наиболее часто в качестве тестовой молекулы выбирается молекула воды, поскольку H_2O является конечным продуктом сгорания углеводородных компонентов топлива. По концентрации паров воды на финальных стадиях процесса горения определяется эффективность сгорания топлива.

Измерение температуры газовой среды методом ДЛАС основывается на предположении о термодинамическом равновесии (ТДР) в зоне горения, которое выполняется при характерных временах процессов порядка долей миллисекунд и при полном давлении газовой смеси больше 0.1 атм. Перестраивая длину волны излучения ДЛ, можно зарегистрировать интенсивности разных линий поглощения и по их отношению определить температуру.

Длина волны ДЛ может перестраиваться относительно медленно (с частотами порядка 1 Гц) за счет изменения температуры кристалла (например, встроенным элементом Пельтье) или достаточно быстро (с частотами в сотни кГц) за счет изменения тока инжекции, который нагревает p - n -переход и изменяет концентрацию носителей тока в переходе. Диапазон медленной перестройки может составлять 10–20 см^{-1} . Диапазон быстрой токовой перестройки для ДЛ с распределенной обратной связью варьируется для различных типов лазеров в пределах 1–3 см^{-1} и уменьшается с увеличением скорости перестройки. Полное время быстрого сканирования ДЛ в диапазоне $\sim 1.5 \text{ см}^{-1}$ может составлять 0.1–1.0 мс.

Спектральный диапазон перестройки длины волны выбирается таким образом, чтобы в этом диапазоне лежали линии поглощения тестовой молекулы, характерной для процесса горения. Энергии нижних уровней выбранных линий должны сильно различаться, а их населенности в условиях термодинамического равновесия существенно зависеть от температуры среды.

При сканировании длины волны ДЛ приемная система регистрирует уменьшение интенсивности прошедшего излучения при совпадении мгновенной длины волны ДЛ с линией поглощения тестовой молекулы. В дальнейшем температура среды определяется по отношению измеренных интегральных интенсивностей линий.

При диагностике процессов горения требуется измерение параметров зоны горения в нестационарных условиях. Конкретная реализация метода ДЛАС зависит от параметров зоны горения, основным из которых является полное давление смеси. В [8–10] сообщалось о разработке метода ДЛАС для определения температуры и парциального давления паров воды в высокоскоростных потоках

при полном давлении газовой смеси 250–400 Тор. Характерные времена изменения плотности и температуры в таких потоках ($> 10^{-4}$ с) позволяют использовать модель ТДР в среде, однако в этом случае требуется измерять поглощение при временах развития процесса порядка миллисекунд.

Существует значительный класс силовых установок, в которых процесс горения происходит при повышенных давлениях. В этих условиях линии поглощения уширяются до величин ~ 0.2 – 0.5 см^{-1} , что исключает возможность нахождения спектрального диапазона ~ 1 – 3 см^{-1} с неперекрывающимися линиями поглощения. В этой ситуации схема ДЛАС с одним ДЛ, регистрирующим за один цикл перестройки несколько линий, перестает работать. Альтернативным решением этой проблемы является использование двух ДЛ, работающих в разных спектральных диапазонах. Такое решение позволяет выбирать сильные линии поглощения так, чтобы каждый лазер регистрировал одну уширенную, но, желательно, изолированную линию молекулы.

В данной статье сообщается о результатах разработки нового варианта ДЛАС-спектрометра, пригодного для измерения параметров нестационарной зоны горения в условиях высоких температур (до ~ 2000 К) и давлений газовой смеси 1–5 атм. В разработанном варианте используются два ДЛ с единой для обоих лазеров системой управления, регистрации и обработки данных. Выполнены испытания прибора в лабораторных условиях и на силовом стенде ЦАГИ. Для диагностики на реальной силовой установке требовалось измерение температуры в указанном выше диапазоне параметров зоны горения и в условиях протекания процесса в течение 5–10 с при временном разрешении порядка 50 мс.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Распространение света через поглощающую среду подчиняется закону Бугера–Ламберта, который в случае малого поглощения и одиночной линии принимает форму

$$I_v = I_{v,0} \exp [-S(T)g(v - v_0)NL] \approx \approx I_{v,0} - I_{v,0}S(T)g(v - v_0)NL. \quad (1)$$

Здесь I_v – интенсивность монохроматического излучения с частотой ν после прохождения через объект длиной L , $S(T)$ – сила (интегральная интенсивность) линии, $g(\nu - \nu_0)$ – форма линии поглощения, N – концентрация поглощающих частиц. Сила линии зависит от температуры, форма линии зависит от давления и состава газовой смеси и определяется механизмами уширения. При давлениях, не сильно отличных от атмосферного, форма спектральной линии $g(\nu - \nu_0)$ с хорошей

точностью описывается фойгтовским контуром, который является сверткой гауссова контура (контур Доплера) с лоренцевым. Контур Доплера обусловлен распределением молекул поглощающего газа по скоростям из-за теплового движения и его ширина $\Delta\nu_D$ для данной молекулы зависит только от температуры и частоты линии поглощения. Для молекулы H_2O вблизи 1.4 мкм $\Delta\nu_D$ изменяется от 0.02 см^{-1} при комнатной температуре до 0.06 см^{-1} при $T = 3000 \text{ К}$. Лоренцев контур возникает под действием ударного (столкновительного) уширения. В отличие от простой зависимости ширины контура Доплера, лоренцева ширина линии поглощения $\Delta\nu_L$ зависит от давления смеси и концентрации входящих в нее компонентов, коэффициенты столкновительного уширения γ_L различны для разных линий и имеют разную температурную зависимость. Для тех же линий поглощения H_2O при $T = 3000 \text{ К}$ и уширении воздухом $\Delta\nu_L$ составляет $0.01\text{--}0.025 \text{ см}^{-1}$ при давлении $P = 0.5 \text{ атм}$ и $0.05\text{--}0.15 \text{ см}^{-1}$ при $P = 3 \text{ атм}$. Результирующие типичные ширины линий поглощения при $T = 3000 \text{ К}$ и $P \sim 0.5 \text{ атм}$ определяются, главным образом, доплеровским уширением и составляют $0.06\text{--}0.07 \text{ см}^{-1}$. При той же температуре и давлении $P = 3 \text{ атм}$ основной вклад в ширину линии дает столкновительное уширение и ширина фойгтовского контура составляет от 0.08 до 0.15 см^{-1} . В этих условиях одномодовые (одночастотные) ДЛ с шириной линии излучения $\sim 10\text{--}50 \text{ МГц}$ могут рассматриваться как монохроматические и уравнение (1) с очень хорошей точностью применимо для интерпретации абсорбционных измерений.

Метод определения температуры из спектров поглощения основан на том факте, что сила линии поглощения зависит от энергии нижнего квантового состояния, с которого происходит переход. При выборе двух линий с существенно отличающимися стартовыми энергиями отношение сил этих линий в условиях ТДР является однозначной функцией температуры [1]

$$R = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)_{T_0} \exp \left[-\frac{\Delta E}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (2)$$

где S_1 и S_2 – силы линий для некоторой температуры T_0 , а ΔE – энергетический зазор между нижними состояниями. Силы линий для многих переходов большинства простых молекул при комнатной температуре хорошо определены и занесены в базы данных (NITRAN [11], NITEMP [12], GEISA [13]).

Относительная ошибка в определении температуры зависит от ошибки измерения сил линий ΔS [14]

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{T}{T_{\text{эф}}} \left(\frac{1}{S_1^2} + \frac{1}{S_2^2} \right)^{1/2} \Delta S = \frac{T}{T_{\text{эф}}} (1 + R^2)^{1/2} \frac{\Delta S}{S_1},$$

где $T_{\text{эф}} = \frac{hc\Delta E}{k}$, а ошибки в определении $S_{1,2}$ считаются независимыми и равными по величине ΔS . С учетом полученных аналитических выражений была составлена программа, по которой из базы данных NITRAN выбирались пары линий поглощения по критерию точности определения $\Delta T/T$. При этом считалось, что реализуемая в условиях силовой установки минимальная детектируемая величина $(\Delta S/S)_{\text{min}} \sim 10^{-3}$, а требуемый диапазон измерения температур составляет $500\text{--}2500 \text{ К}$. Отметим, что согласно (2) при фиксированном значении $\Delta S/S$ относительная ошибка $\Delta T/T$ в определении температуры растет пропорционально T , а абсолютная ΔT – пропорционально T^2 .

Таким образом, из (2) при одновременном измерении поглощения на нескольких линиях может быть вычислена температура в зондируемом объеме. Концентрация поглощающего компонента N при однородном распределении молекул вдоль оптического пути определяется затем из абсолютной величины поглощения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Общая принципиальная схема ДЛАС-спектрометра с двумя ДЛ представлена на рис. 1. Спектрометр ДЛАС состоит из блока диодных лазеров (БДЛ), блока управления и регистрации оптических сигналов (БУРОС), фотоприемного блока (ФБ) и системы оптических и электрических кабелей. БДЛ и БУРОС расположены в общем металлическом корпусе. ФБ находится обычно на фланце измерительной камеры.

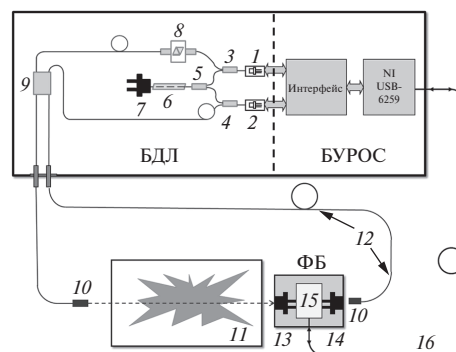


Рис. 1. Общая схема ДЛАС-спектрометра: 1, 2 – диодные лазеры; 3–5, 9 – оптоволоконные мультиплексоры; 6 – реперная кювета с парами воды; 7 – фотодиод канала стабилизации; 8 – оптоволоконный аттенюатор; 10 – градиентные коллиматоры; 11 – измерительная камера; 12 – оптоволоконные кабели; 13 – фотодиод измерительного канала; 14 – фотодиод референтного канала; 15 – дифференциальный преусилитель; 16 – электрический кабель.

ДЛ работают в импульсно-периодическом режиме, при этом импульсы тока подаются на лазеры последовательно (режим временного мультиплексирования). Излучение двух ДЛ из основного блока направляется к тестовому объекту. Прошедшее через объект излучение собирается оптической системой на фотоприемник, сигнал с которого усиливается в предусилителе и передается по витому кабелю в систему регистрации и обработки данных. Оцифрованный сигнал поступает на компьютер для последующей обработки.

Блок диодных лазеров. В разработанном ДЛАС-спектрометре использовались ДЛ с распределенной обратной связью на диапазон 1.4 мкм. Выбор конкретных ДЛ зависел от диапазона давлений и температур в тестируемом объекте. Как отмечалось во Введении, наиболее часто в качестве тестовой молекулы используется молекула воды. Валентные колебания молекулы H_2O расположены в диапазоне 2.8 мкм. Стоимость диодных лазеров на этот диапазон примерно в 10 раз выше стоимости лазеров на диапазон 1.4 мкм. Интенсивности линий поглощения в области 1.4 мкм (первый обертона и комбинационные тона) примерно на порядок ниже, однако надо иметь в виду, что интенсивность наиболее сильных линий основного тона столь велика, что в условиях диагностики реальных силовых систем, в которых концентрация воды может достигать нескольких процентов, поглощение зондирующего излучения на трассе в рабочем объеме насыщается и измерение сил линий становится невозможным. Используемые ДЛ на диапазон 1.4 мкм являются оптимальным выбором с точки зрения соотношения цена лазеров/интенсивность линий поглощения H_2O . Следует еще добавить, что и стоимость фотоприемников на диапазон > 2 мкм на порядок выше, а их метрологические характеристики (токи утечки, быстродействие, размер чувствительной области) хуже используемых в данном макете InGaAs фотоприемников.

Была разработана программа выбора оптимальных пар линий поглощения воды в диапазоне 1.3–1.5 мкм из большого числа линий в спектральных базах данных. Основными критериями для выбора линий были: 1) интенсивность, 2) отсутствие близких интерферирующих линий самой воды и основных компонентов газов, участвующих в процессе горения (O_2 , CO_2 , CO и т.п.). В случае невысоких давлений (< 1 атм) использовались два ДЛ: один – на диапазон 1.391 мкм, второй – на диапазон 1.41 мкм. Для более высоких давлений (выше 1 атм) оптимальной комбинацией оказалась пара ДЛ на 1.39 и 1.343 мкм.

БДЛ содержит следующие основные узлы:

- два ДЛ, состыкованных с одномодовыми волноводами (pigtail);
- термодатчики, измеряющие температуру ДЛ;

– элементы Пельтье, позволяющие управлять температурой ДЛ;

– оптическую систему для стабилизации частоты излучения ДЛ по реперным линиям;

– световоды и мультиплексоры для разведения оптических лучей и вывода из блока.

Мультиплексоры 3 и 4 делят излучение каждого ДЛ в пропорции 1 : 1. В мультиплексоре 5 два луча от каждого лазера с уменьшенной на 50% интенсивностью объединяются в одном одномодовом световоде и подаются на систему контроля и стабилизации. В мультиплексоре 9 два луча от каждого лазера также с уменьшенной на 50% интенсивностью сначала объединяются, а затем излучение делится в равных долях по двум одномодовым световодам. По одному световоду излучение от ДЛ направляется к тестируемому объекту, по другому – в референтный канал.

Все узлы БДЛ помещены внутрь металлического корпуса, что 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.

Оптическая схема. Из БДЛ излучение обоих лазеров по одному световоду доставляется к тестируемому объекту 11 и после его прохождения на фотодиод 13, а по другому – на фотодиод 14. Оба световода оканчиваются градиентными объективами 10 (граданами), которые формируют малорасходящиеся лучи диаметром 2 мм непосредственно перед входом в объект и референтным входом в фотоприемный блок. На расстоянии примерно 10 см от входного окна в камеру до фотодиода 13 измерительного канала диаметр лазерного пучка увеличивается до ~ 2.5 мм.

Фотоприемный блок. В ФБ смонтировано сферическое отражающее зеркало и два фотодиода InGaAs 13 и 14 с диаметром чувствительной области 2 мм. Перед фотодиодом 13 измерительного канала установлен фильтр, отсекающий излучение с длинами волн меньше 900 нм. Этот фильтр уменьшает засветку приемника от коротковолновой части собственного теплового излучения зоны горения. В ФБ располагается также дифференциальный предусилитель 15. Применение дифференциальной схемы измерений позволяет максимально очистить аналитический сигнал поглощения от вариаций интенсивности излучения ДЛ, не связанных с поглощением молекул воды, в частности от вариаций, сопутствующих изменению интенсивности излучения ДЛ при изменении тока инжекции, а также от избыточных лазерных низкочастотных шумов [8]. В хорошо сбалансированной схеме выходной дифференциальный сигнал

пропорционален сигналу поглощения. Для нормировки по интенсивности дополнительно измерялся и прямой сигнал прошедшего через объект излучения, повторяющий трапецевидную форму лазерного импульса.

Блок управления и регистрации оптических сигналов. БУРОС разработан на основе многофункциональной платы ввода/вывода NI USB-6259 [15]. Блок обеспечивает:

- 1) управление температурой и током инжекции лазеров;
- 2) усиление и оцифровку сигналов с фотоприемников аналитического и канала стабилизации.

Плата ввода/вывода NI USB-6259 через USB-порт связана с компьютером и обеспечивает передачу данных в память компьютера.

Программное обеспечение БУРОС написано на основе графической среды разработки приложений LabView. Программа состоит из нескольких подпрограмм, каждая из которых выполняет определенные, заданные оператором, функции: установку токовых и температурных режимов генерации ДЛ, стабилизацию циклов сканирования по линиям поглощения газа в реперной кювете, линейаризацию шкалы волновых чисел, симуляцию спектров в заданном диапазоне, подгонку экспериментальных спектров симулированными и т.д.

В работе программы задействованы четыре ЦАП и пять АЦП с дифференциальными входами. Два ЦАП работают в схеме поддержания заданной температуры ДЛ, регулируя ток через элемент Пельтье. Другие два формируют непрерывную последовательность импульсов токов инжекции. Форма импульсов может задаваться оператором. АЦП оцифровывают сигналы, поступающие с датчиков температуры каждого лазера, фотоприемника канала стабилизации и ФБ спектрометра.

Программа обеспечивает режим сканирования длины волны лазеров, калибровку лазеров в шкале абсолютных длин волн и учет отклонения перестроечной характеристики лазера (зависимость частоты излучения от величины тока инжекции) от линейности.

Сканирование частоты излучения ДЛ происходит за счет изменения тока инжекции. В данном варианте ДЛАС-спектрометра перестройка частоты осуществлялась периодическими импульсами тока инжекции трапецевидной формы с крутыми начальным и конечным фронтами и линейным нарастанием тока от момента включения до выключения импульса. В такт с линейным увеличением тока по примерно линейному закону изменялась частота излучения лазеров. Импульсы тока инжекции подавались на оба ДЛ последовательно, так что в каждый момент времени в испытуемый

объект поступало излучение только одного ДЛ. Частота следования импульсов каждого ДЛ составляла 25 Гц, длительность измерения в одном скане ~ 20 мс, в течение которых каждый ДЛ перестраивался в своем диапазоне сканирования $\sim 2-3$ см $^{-1}$.

Принцип стабилизации и управления температурами ДЛ описан в [16]. Стабильность температуры составляла $\sim 10^{-4}$ К в диапазоне изменения от 4 до 50 °С.

Вид перестроечной характеристики лазера зависит как от частоты модуляции тока инжекции, так и от диапазона изменения тока, поэтому градуировка шкалы волновых чисел (длин волн) осуществлялась при фиксированных рабочих режимах лазера, используемых в реальных измерениях параметров газовой среды. Калибровка спектрального диапазона перестройки ДЛ в шкале абсолютных частот проводилась путем регистрации во всем диапазоне перестройки ДЛ спектра поглощения воды при комнатной температуре и максимумов пропускания стабильного эталона Фабри–Перо [16]. Процедура выбора параметров лазеров и определение перестроечных кривых производится один раз в процессе предварительной настройки прибора. В дальнейшем эта процедура необходима только при замене лазера или выборе другого спектрального диапазона сканирования. При обычном использовании прибора после запуска программы выход лазеров на рабочий режим осуществляется за время ~ 1 мин, а диапазон сканирования лазеров и стабильность их перестроечных кривых обеспечиваются с точностью не менее 1×10^{-3} см $^{-1}$.

При оцифровке аналитических сигналов (прямого и дифференциального) значение сигнала (одна точка на временной шкале) регистрируется через промежуток времени, равный ~ 65 мкс. Для каждого лазера за один интервал регистрации (20 мс) оцифровываются 300 отсчетов (точек), из которых 270 отсчетов оцифровываются в течение длительности импульса тока, а остальные 30 точек (шесть в начале и 24 в конце интервала регистрации) служат для определения нулевого уровня сигнала при выключенном лазере. Полное время регистрации процесса составляло ~ 10 с. За это время регистрировалось ~ 260 сканов для каждого лазера.

ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Разработанный вариант ДЛАС-спектрометра испытывался в лабораторных измерениях. Для этого была сконструирована специальная кювета, в которой можно было плавно изменять и поддерживать температуру в пределах 300–1300 К и давление от 0.01 до 1 атм [14].

В лабораторных условиях проверялись функционирование всех узлов ДЛАС-спектрометра

и алгоритм получения температуры газа в результате обработки экспериментальных спектров. Для указанного диапазона давлений на основании теоретических оценок были выбраны следующие спектральные диапазоны: 7188.8–7191.1 см⁻¹ (DL1) и 7084.4–7086.2 см⁻¹ (DL2). Этот выбор был продиктован достаточно высокой интенсивностью линий поглощения H₂O, что обеспечивало требуемую точность определения их интегральных интенсивностей. В лабораторных измерениях использовались ДЛ с распределенной обратной связью фирмы NEL [17].

Методики обработки данных

В разработанном спектрометре реализовано несколько методик определения температуры на основе зарегистрированных спектров поглощения воды: визуальное определение температуры, корреляционная методика и подгонка теоретическим спектром. В процессе испытаний макета в лаборатории использовались разные методики и режимы обработки данных и сравнивались их результаты.

Визуальное определение температуры. Разработана методика оценки температуры газовой среды путем сравнения экспериментально зарегистрированного спектра поглощения воды с набором симулированных на основе базы данных HITRAN. Пример работы этого варианта приведен на рис. 2 и 3.

На рис. 2 для иллюстрации показаны спектры для комнатной температуры и давления в камере $P = 1$ атм.

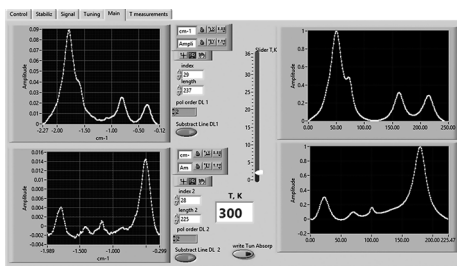


Рис. 2. Снимок экрана монитора при визуальной оценке температуры по экспериментальным спектрам.

В левых окнах приведены экспериментально зарегистрированные спектры поглощения для лазера DL1 в диапазоне 7188.8–7191.1 см⁻¹ (верхнее окно) и лазера DL2 в диапазоне 7084.4–7086.2 см⁻¹ (нижнее окно). В правых окнах – спектры поглощения в тех же диапазонах, симулированные на основе базы данных HITRAN-2012. Приведенные на рисунке экспериментальные спектры прошли предварительную обработку – линейризацию и привязку к абсолютной шкале частот и вычитание базовой линии. Учет базовой линии осуществлялся путем подбора степени ортогонального полинома, вычитаемого из зарегистрированного спектра.

Симулированные спектры рассчитывались с использованием базы HITRAN-2012 [11] для известных экспериментальных параметров среды: давление $P = 1$ атм, длина кюветы $L = 10$ см, концентрация воды – 1%, температура T_i . Программа симулировала линии для диапазона температур 200–2000 К с шагом 50 К. Модельные спектры умножались на экспериментально определенные для каждого лазера зависимости интенсивности излучения ДЛ от величины тока накачки. Спектры нормировались на максимум поглощения в рассматриваемом спектральном диапазоне. Примеры экспериментальных и модельных спектров для температур 700 и 1050 К приведены на рис. 3.

Имея перед глазами экспериментальные спектры в левой части экрана и симулированные – в правой, оператор ручным перемещением движка на шкале температуры (полоска с цифровой шкалой в середине экрана) добивается наилучшего визуального совпадения спектров. В окне $[T, K]$ появляется температура, соответствующая наилучшему совпадению экспериментальных и теоретических спектров.

Корреляционная методика. Корреляционная методика измерения температуры в газовом потоке с использованием линий поглощений сводится к вычислению линейного коэффициента корреляции k (коэффициент корреляции Пирсона) между нормированными экспериментальными спектрами ($\Delta I_v / I_{v,0}$) и симулированными спектрами

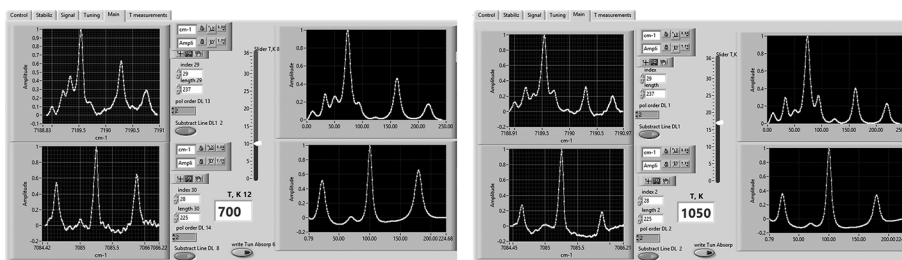


Рис. 3. Снимок экрана монитора для температур 700 и 1050 К: левые окна – эксперимент, правые окна – симулированные спектры.

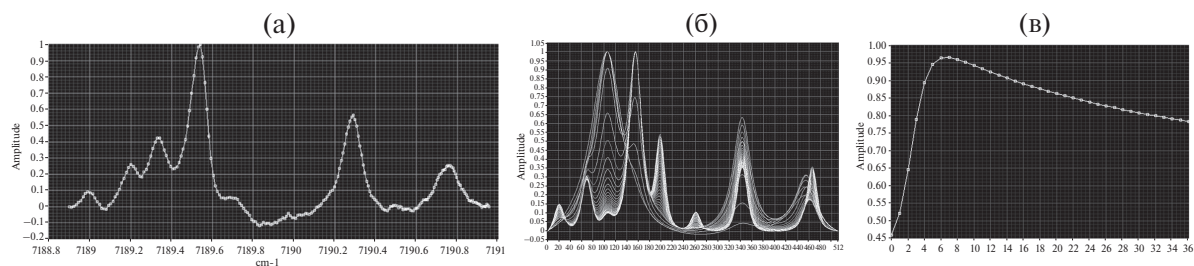


Рис. 4. Спектры поглощения H₂O для лазера DL1 (а), симулированные спектры (б) и корреляционная функция экспериментального и симулированных спектров (в).

поглощения паров воды при различных температурах и нахождению максимума коэффициента, соответствующего измеряемой температуре T_{exp} [16].

На рис. 4а для лазера DL1 представлен экспериментальный спектр при температуре T_{exp} , на рис. 4б – симулированные спектры для температур T_i от 300 до 2000 К с шагом 50 К, на рис. 4в – коэффициент корреляции k между экспериментальным и модельными спектрами в зависимости от номера модельной функции i . В приведенном примере максимум корреляционной функции приходится на $i = 7$, что соответствует $T_{\text{exp}} = 650$ К.

Для уменьшения влияния базовой линии и различного вида фликкерных шумов системы при вычислении величины k предусмотрен вариант перехода в базис производных. Для приведенного выше примера максимум корреляционной функции для производных экспериментального и симулированных спектров пришелся на $T_{\text{exp}} = 700$ К. Корреляция по производным менее чувствительна к относительно медленным вариациям базовой линии. Значения температуры, полученные по корреляциям производных, представляются более правильными. Процедура нахождения T_{exp} по корреляции спектров встроена в головную программу и выполняется непосредственно после оцифровки экспериментальных данных и передачи их в компьютер.

Подгонка теоретическим спектром. В условиях сильных шумов, нестабильности базовой линии, а также частичного перекрытия линий поглощения непосредственное интегрирование зарегистрированного спектра приводит к большим ошибкам в определении интенсивностей линий. Более адекватным подходом в таких условиях является аппроксимация экспериментальных данных модельными участками спектра в пределах диапазона сканирования ДЛ. Адекватность такого алгоритма обработки продемонстрирована в [8, 14] для случая низких давлений смеси, когда линии поглощения достаточно узки и разрешены.

На основе баз данных HITRAN-2012 и NITEMP с учетом коэффициентов уширения воздухом и самоуширения (т.е. уширения при столкновениях молекул воды друг с другом) симулируется участок спектра с выбранными линиями поглощения, который подгоняется к экспериментальным данным. В качестве подгоночных параметров используются положения центров линий, температура, концентрация молекул воды. В подгонку включается базовая линия, представляемая как сумма ортогональных полиномов. При реализации этого алгоритма возникают дополнительные трудности, связанные с тем, что в процессе горения изменяется не только температура, но и концентрация компонентов, а также полное давление смеси. К сожалению, коэффициенты уширения воздухом и самоуширения линий поглощения H₂O и, что особенно важно, их зависимости от температуры известны с достаточно большой погрешностью. Также неизвестны параметры уширения линий H₂O другими компонентами смеси. Тем не менее такой алгоритм в условиях плохого отношения сигнал/шум и неперекрывающихся линий поглощения дает лучшие результаты по сравнению с подгонкой отдельными контурами [14].

Результаты измерений

Для проверки работоспособности ДЛАС было выполнено несколько серий лабораторных измерений спектров поглощения воды в диапазоне температур от комнатной до 1200 К. Нагреваемая кювета заполнялась атмосферным воздухом. Концентрация воды и давление соответствовали комнатным значениям. В нескольких экспериментах для увеличения сигнала поглощения в кювету дополнительно впрыскивалась вода. Результаты определения температуры разработанными способами приведены в таблице. Как видно из таблицы, в диапазоне 400–800 К данные, полученные методом ДЛАС, совпадают со значениями термометры в пределах ± 30 К. Для температур, превышающих 1000 К, различие данных ДЛАС и термометры растет до ± 90 К.

Результаты определения температуры в кювете

Термо-пара	Визуальная оценка	Корреляционная методика		Подгонка теоретическими спектрами	
		DL1	DL2	DL1	DL2
390	400	400	400	380	390
690	700	650	700	660	710
830	800	750	800	790	860
1035	1050	950	1100	970	1130

ИСПЫТАНИЯ НА СИЛОВОМ СТЕНДЕ ЦАГИ

В лабораторных условиях комплекс ДЛАС прошел первые испытания на опытном стенде Т-131 в ЦАГИ.

Описание установки

Стенд Т-131 предназначен для изучения рабочих процессов в камере сгорания (КС) высокоскоростных прямоточных воздушно-реактивных двигателей. Для пропуска лазерного излучения внутрь КС был изготовлен специальный оптический отсек (рис. 5) с жаростойкими сапфировыми окнами. На рис. 5а стрелкой указан фотоприемный блок ФБ с оптической системой сбора прошедшего через камеру излучения ДЛ, фотоприемником и преусилителем. Входной блок с системой формирования пучка ДЛ маскируется системой шлангов. Вся аппаратура БУРОС расположена в другом помещении, изолированном от электрических и акустических наводок. На рис. 5б показана общая схема модельной камеры сгорания со встроенным оптическим и дроссельным отсеками. Дроссельный отсек (на схеме – последний) служит для торможения сверхзвукового потока (в данном случае число

Маха ≈ 2.5), создания перед ним области с повышенными давлением и температурой. Дросселирование осуществляется путем поджатия проходного сечения канала с помощью поперечных газовых струй или установкой вертикального пилона в центральной плоскости. Более детальное описание установки Т-131 можно найти в работе [18].

Эксперименты с ДЛАС-спектрометром охватывали достаточно широкий диапазон статического давления и температуры в зондируемой области потока $P = 0.6-3.3$ атм, $T = 600-1900$ К, что соответствует условиям в подогревателе $P_0 = 10-15$ атм, $T_0 = 1300-2000$ К. Подогрев воздуха в огневом подогревателе до необходимого уровня осуществлялся путем подачи туда в нужных пропорциях воздуха, керосина и кислорода. Таким образом, исследуемый поток всегда содержал достаточное для применения ДЛАС-спектроскопии количество паров воды – основного продукта горения (наряду с CO_2) керосина в воздушной среде. В зависимости от задаваемой температуры в подогревателе массовая доля паров воды в потоке составляла 3–8%.

Отличие оптической схемы аппаратуры в ЦАГИ от варианта для лабораторных испытаний заключалось в том, что излучение лазеров подавалось к стенду с помощью длинных оптических одномодовых кабелей. Одномодовые световоды для транспорта сигнального и референтного излучения ДЛ составляют в длину 30 м. 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 с силовой установкой.

Оптический блок с формирователем пучка ДЛ укреплялся на фланце входного окна камеры; фотоприемный блок с системой сбора излучения аналитического и референтного каналов, фотоприемниками и дифференциальным преусилителем размещались на выходном фланце (см. рис. 5). Для снижения тепловой нагрузки на оптические элементы оба блока укреплялись на тубусах длиной 30 см. Для устранения поглощения излучения ДЛ в атмосферном воздухе вне камеры тубусы продувались аргоном.

Испытания разработанного макета ДЛАС-спектрометра в условиях реального стенда Т-131 потребовали корректировки оптимальных пар линий поглощения. Поскольку диапазон давлений газового потока в камере Т-131 был значительно шире (0.5–3 атм), чем в лабораторной кювете, использованные в лабораторных экспериментах спектральные линии значительно уширились при высоких давлениях и перекрывались. Для экспериментов в ЦАГИ были заменены диодные лазеры.

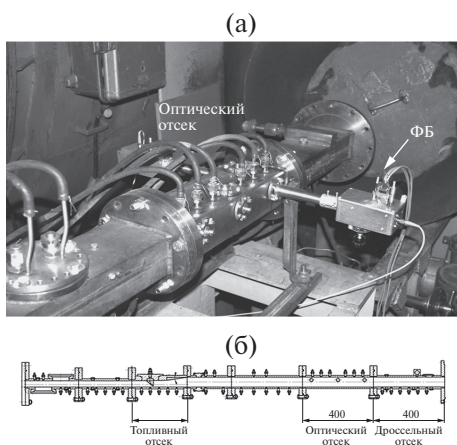


Рис. 5. Оптический отсек стенда Т-131 (а) с установленным на нем лазерным оборудованием и схема модельной камеры сгорания (б) с присоединенными оптическим и дроссельным отсеками.

Вместо ДЛ фирмы NEL использовались лазеры фирмы Sacher Lasertechnik [19]. Эти лазеры могут перестраиваться за счет изменения тока инжекции в большем спектральном диапазоне — до 3 см^{-1} , что расширяет возможности выбора оптимальных линий поглощения. Для таких условий оптимальной схемой оказалась комбинация линий 7185 см^{-1} (DL1) и 7444 см^{-1} (DL2). Первая линия соответствует поглощению с более низкого энергетического уровня и поэтому интенсивна при низких температурах. Комбинация линий для DL2 отвечает переходам с более высоких уровней, их относительная интенсивность увеличивается с ростом температуры.

Результаты измерений

Первые измерения проводились с напуском подогретого воздуха без впрыска топлива. Воздух нагревался в отдельной камере до определенной температуры, затем включался клапан, и поток нагретого воздуха попадал в рабочую камеру сгорания при давлении примерно 700 Тор . В определенный момент включалась дроссельная заслонка, давление и температура потока повышались, и после примерно 3–5 с процесс прекращался. Во время пуска оба ДЛ работали попеременно в режиме постоянного сканирования длины волны; начало регистрации задавалось синхроимпульсом. Общая длительность регистрации спектров составляла примерно 10 с. Непосредственно после регистрации спектров они обрабатывались on-line с помощью программы подгонки теоретическими спектрами, написанной в среде LabView. Данные о температуре и концентрации дополнительно проверялись и уточнялись с помощью программы подгонки теоретическими спектрами, написанной на языке MatLab (off-line).

Для визуального представления данных использовалась процедура первичной обработки и построения 2D- и 3D-образов нестационарных экспериментальных спектров [8, 20]. Эти образы дают наглядное представление о динамике изменения спектров поглощения, зарегистрированных за время пуска установки. Пример 2D-спектров приведен на рис. 6.

Программа построения 2D-спектров преобразует одномерную временную последовательность зарегистрированных дифференциальных спектров в двухмерную картинку, в которой каждая строка соответствует одному скану, а яркость изображения в каждой точке величине сигнала. В тот момент, когда длина волны ДЛ совпадает с длиной волны линии поглощения, наблюдается изменение интенсивности прошедшего через камеру излучения, что проявляется в виде увеличения яркости. Все сканы отображаются один под другим.

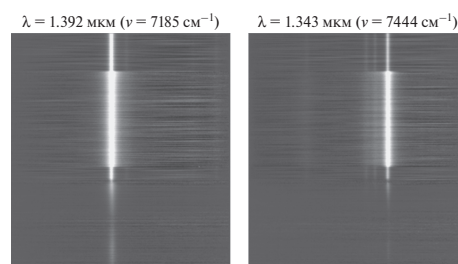


Рис. 6. 2D-образы нестационарных спектров поглощения на двух выбранных линиях воды для пуска нагретого воздуха в камеру (дифференциальный сигнал).

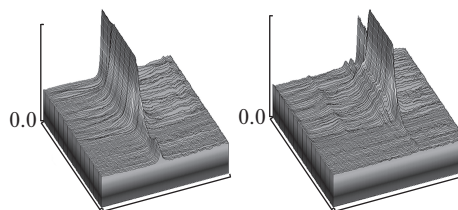


Рис. 7. 3D-профили нестационарных спектров поглощения воды в процессе пуска горячего воздуха.

Последовательность отображения сканов такова, что начало процесса находится на первой верхней строке, а его конец — на нижней. Этот 2D-образ подобен развертке электронного луча в старых телевизорах с электронно-лучевыми мониторами.

3D-профили тех же спектров поглощения приведены на рис. 7. На этих трехмерных профилях каждый скан представляет полоску, вытянутую слева направо, а последовательность сканов укладывается от задней части рисунка к передней. Так же как и на 2D-спектрах, левая картинка построена для линии $\lambda = 1.392 \text{ мкм}$, а правая — для линии 1.343 мкм .

На рис. 6 и 7 отчетливо видна вся динамика развития процесса: начальный этап, при котором интенсивности линий соответствуют температуре горячего воздуха ($\sim 700 \text{ К}$) при пониженном давлении; этап с дросселированием, при котором растут интенсивности линий и они уширяются вследствие увеличения давления; конечный этап, в котором происходит остывание объема после выключения продувки. На конечном этапе работы установки происходит отключение дросселя, воздухоподогревателя и включение завершающей холодной продувки. Видно, что “горячая” линия (1.343 мкм) на этом этапе практически исчезает.

На рис. 6 и 7 видно, что до включения режима дросселирования при давлении ниже атмосферного линии поглощения H_2O достаточно узкие. Разрешаются слабые линии в окрестности “горячей” линии (правая верхняя панель). При включении режима дросселирования давление возрастает

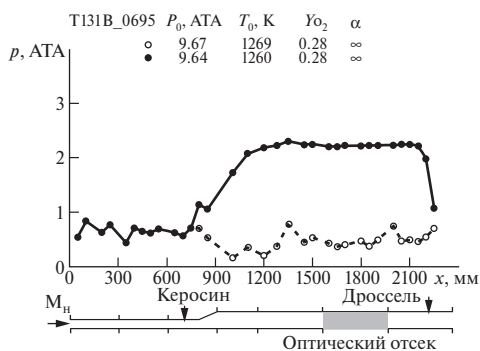


Рис. 8. Экспериментально измеренное распределение давления вдоль канала в два разных момента времени: до и после включения дросселя.

и линии существенно уширяются. Линии не разрешаются, и подгонка контуров должна включать учет слабых линий, сидящих на крыле.

Статическое давление смеси измерялось независимо и составляло в этих пусках от ~ 0.5 атм (без дросселирования) до 2.5 атм (после включения дросселя). Измерения давления на стенде Т-131 проводились вдоль всего тракта трубы в ее продольной плоскости симметрии. В испытаниях не ставилась задача исследования пульсаций давления, поэтому использовались стандартные датчики давления ИКД-5 и ИКД-7. Инерционность датчиков определялась длиной воздушной трассы в трубках, по которым происходит передача давления от потока к датчику (2–3 м). Экспериментально измеренное распределение давления вдоль канала для представленного выше пуска показано на рис. 8.

Для определения температуры и концентрации молекул H_2O использовался алгоритм подгонки теоретическими спектрами, в основном аналогичный разработанному для давлений смеси до 1 атм. На основе баз данных HITRAN-2012 и HITEMP симулировались выбранные участки спектра, которые подгонялись к экспериментальным данным для двух лазеров нелинейным методом наименьших квадратов (НМНК). В качестве подгоночных параметров использовались общие для двух спектров температура и концентрация молекул воды.

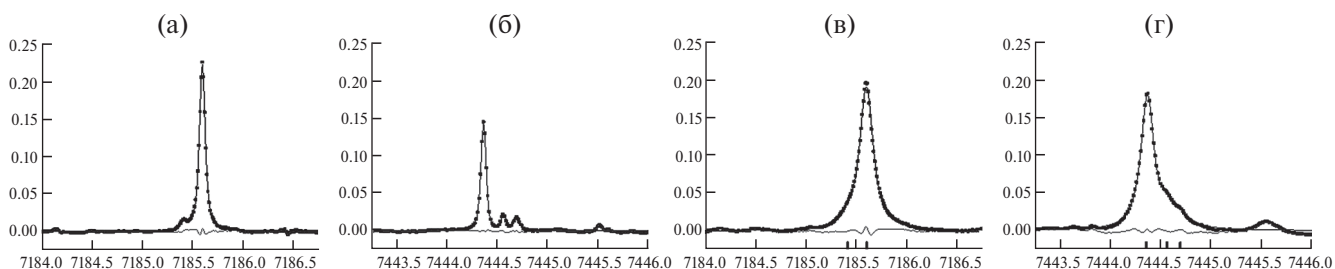


Рис. 9. Экспериментальные и теоретические спектры поглощения: (а), (в) – 1.392 мкм; (б), (г) – 1.343 мкм; (а), (б) – до включения дросселирования; (в), (г) – в режиме дросселирования; точки – экспериментальные данные, сплошные линии – наилучшая подгонка теоретическими фойгтовскими профилями, линии под профилями – разница между экспериментом и подгонкой (невязка).

В подгонку включены также базовые линии для каждого из спектров, которые симулировались полиномами, как правило, не выше второй степени.

При давлениях газовой смеси в 1 атм и выше точность данных в HITRAN-2012 по коэффициентам уширения линий поглощения давлением воздуха и их температурной зависимости недостаточна. Данные о температурных зависимостях самоуширения линий H_2O и коэффициенты уширения другими компонентами смеси просто отсутствуют. Поэтому при обработке результатов, полученных на стенде в ЦАГИ, линии поглощения подгонялись фойгтовскими контурами с независимыми лоренцевыми компонентами, которые также выступали в НМНК в качестве подгоночных. Пример результатов такой подгонки экспериментальных спектров, приведенных на рис. 6, 7, представлен на рис. 9.

Была проведена серия измерений в пусках без горения. Измеренные значения T в режиме дросселирования варьировались в диапазоне 900–1200 К в зависимости от режимов нагрева смеси в нагревателе.

На рис. 10 представлена динамика изменения температуры газового потока в месте зондирования, парциального давления и концентрации паров воды в течение одного пуска. Данные о давлении определены стандартным датчиком давлений; данные о температуре, парциальном давлении и относительной концентрации паров воды найдены методом ДЛАС. Каждая точка на графиках получена в результате усреднения экспериментальных спектров, зарегистрированных в пяти последовательных сканах. Следующая точка получена при усреднении следующих пяти сканов. Необходимо обратить внимание, что парциальное давление воды увеличивается в такт с температурой при включении дросселирования (поджатия потока). При этом относительная концентрация паров воды практически не меняется, что соответствует физике протекающего процесса. Этот результат указывает на правильность разработанного метода ДЛАС. Если считать, что вариации температуры на рис. 10 определяются экспериментальными ошибками, то стандартное отклонение определения T

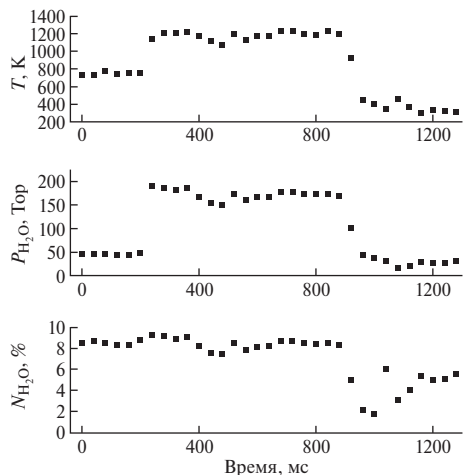


Рис. 10. Динамика параметров газового потока в одном пуске.

в этом пуске составляет ± 45 К при среднем значении 1180 К. Поскольку в экспериментах на силовом стенде в ЦАГИ не было независимого способа измерения температуры, то определить систематическую ошибку не представляется возможным.

Следует отметить еще одно важное обстоятельство. В разработанной методике температура среды определяется как средняя величина по оптическому пути зондирующих лазеров в тестируемом объеме. Такие результаты получаются в подавляющем большинстве работ, посвященных методу ДЛАС. В реальности распределение температуры и концентрации паров воды в газовых потоках неоднородно и для получения информации о неоднородном распределении параметров среды требуется модернизация описанной методики. Возможно несколько подходов к решению этой задачи.

Один из них основан на принципе томографических измерений. Для этого пучки зондирующих лазеров делятся в оптических делителях на несколько пучков, которые пересекают зондируемый объем в разных сечениях. Такой подход позволяет получить информацию о параметрах среды в разных сечениях. При этом существенно усложняется схема спектрометра и процедура обработки массива экспериментальных спектров. Такая система описана в работе [7] для зондирования в зоне свободного выхлопа газов из силовой установки.

Второй подход основан на увеличении числа регистрируемых линий поглощения, моделировании процессов горения и подгонки большего числа экспериментальных линий поглощения с учетом априорной информации о теоретическом распределении температуры вдоль луча. Для реализации такого подхода необходимо использовать диодные лазеры, перестраиваемые по частоте в существенно большем спектральном диапазоне. В последнее время разработаны квантово-каскадные ДЛ (QCL),

ДЛ с вертикальным выходом излучения (VCSEL) и лазеры типа FDML, которые могут перестраиваться током в диапазоне от десятка до нескольких десятков см^{-1} [3].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан новый макет лазерного абсорбционного спектрометра с диодными лазерами для бесконтактного измерения температуры и концентрации паров воды в горячих зонах силовых установок при температурах до 2000 К и давлениях смеси до 3 атм. Для измерения спектров поглощения используются два диодных лазера, зондирующие линии поглощения паров воды, расположенные в разных спектральных диапазонах. В макете использованы оригинальные узлы, позволяющие сканировать длины волн обоих лазеров по заданному закону, измерять слабые сигналы поглощения, оцифровывать их и обрабатывать по разработанному алгоритмам. Работоспособность макета ДЛАС-спектрометра проверена в лабораторных условиях. В лабораторных экспериментах использовались три варианта алгоритма обработки данных. Результаты, полученные тремя методами, удовлетворительно согласуются. Разработанный макет ДЛАС-спектрометра прошел первые испытания на силовой установке Т-131 в ЦАГИ. С помощью ДЛАС измерены бесконтактным методом температура и концентрация паров воды в потоке нагретого газа до и после дросселирования потока, а также динамика изменения температуры. Следует подчеркнуть, что спектр поглощения H_2O в ИК-диапазоне достаточно богат, поэтому верхняя граница измеряемых методом ДЛАС температур определяется не наличием подходящих линий поглощения, а физическими условиями существования паров воды при высоких температурах и давлениях, в частности, процессами диссоциации молекул воды.

В заключение отметим, что рассматриваемый метод измерения температуры с помощью диодных лазеров может быть использован не только для силовых установок, но и для диагностики других процессов горения в газоздушных смесях [21–23]. Возможности диагностики процессов горения на тепловых электростанциях методом ДЛАС уже продемонстрированы экспериментально на примере диагностики CO и H_2O в камере тепловой станции на угле [24].

Работа выполнена с частичной финансовой поддержкой в рамках программы фундаментальных исследований Отделения физических наук «Фундаментальные проблемы лазерных технологий» (проект «Разработка метода бесконтактной диагностики параметров горячих зон смешивающихся сверхзвуковых потоков газов на базе абсорбционной спектроскопии с диодными лазерами»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Allen M.G.* Diode Laser Absorption Sensors for Gas-Dynamic and Combustion Flows // *Meas. Sci. Technol.* 1998. V. 9. P. 545.
2. *Hanson R.K.* Applications of Quantitative Laser Sensors to Kinetics, Propulsion and Practical Energy Systems // *Proc. Combust. Inst.* 2011. V. 33. P. 1.
3. *Bolshov M.A., Kuritsyn Y.A., Romanovskii Y.V.* Tunable Diode Laser Spectroscopy as a Technique for Combustion Diagnostics // *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.* 2015. V. 106. P. 45.
4. *Schulz C., Dreizler A., Ebert V., Wolfrum J.* Combustion Diagnostics. In: *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics.* Berlin–Heidelberg: Springer, 2007. P. 1241.
5. *Wang Z.P., Li F., Gu H.B., Yu X.L., Zhang X.Y.* Experimental Study on the Effect of Combustor Configuration on the Performance of Dual-Mode Combustor // *Aerosp. Sci. Technol.* 2015. V. 42. P. 169.
6. *Sappey A., Sutherland L., Owenby D., VanHoudt P., Hannam J., Zhao Q., McCormick P., Masterson P., Estes M., Williams S., Barhorst T.* Flight-Ready TDLAS Combustion Sensor for Hypersonics // *AIAA Paper 2009–7234.* 2009.
7. *Ma L., Li X., Sanders S.T., Caswell A.W., Roy S., Plemmons D.H. et al.* 50-kHz-Rate 2D Imaging of Temperature and H₂O Concentration at the Exhaust Plane of a J85 Engine Using Hyperspectral Tomography // *Opt. Express.* 2013. V. 21. P. 1152.
8. *Большов М.А., Курицын Ю.А., Лигер В.В., Мироненко В.Р., Леонов С.Б., Яранцев Д.А.* Применение диодной лазерной спектроскопии для измерения параметров газа при плазменно-индуцированном сверхзвуковом горении // *Квантовая электроника.* 2009. Т. 21. С. 869.
9. *Большов М.А., Курицын Ю.А., Леонов С.Б., Лигер В.В., Мироненко В.Р., Савелкин К.В., Яранцев Д.А.* Измерение температуры и концентрации паров воды в сверхзвуковой камере сгорания методом абсорбционной спектроскопии // *ТВТ.* 2010. Т. 48. Доп. вып. С. 9.
10. *Bolshov M.A., Kuritsyn Y.A., Liger V.V., Mironenko V.R., Leonov S.B., Yarantsev D.A.* Measurements of the Temperature and Water Vapor Concentration in a Hot Zone by Tunable Diode Laser Absorption Spectrometry // *Appl. Phys. B.* 2010. V. 100. P. 397.
11. *Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y., Barbe A., Benner D.C., Bernath P.F. et al.* The HITRAN2012 Molecular Spectroscopic Database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2013. V. 130. P. 4.
12. *Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J., Dothe H., Gamache R.R., Goldman A. et al.* HITRAN, the High-Temperature Molecular Spectroscopic Database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2010. V. 111. P. 2139.
13. *Jacquinet-Husson N., Crepeau L., Armante R., Boutamine C., Chédin A., Scott N.A. et al.* The 2009 Edition of the GEISA Spectroscopic Database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2011. V. 112. P. 2395.
14. *Большов М.А., Курицын Ю.А., Лигер В.В., Мироненко В.Р.* Разработка метода абсорбционной спектроскопии с диодными лазерами для определения температуры и концентрации молекул в удаленном объекте // *Оптика и спектроскопия.* 2011. Т. 110. № 6. С. 900.
15. NI USB-6259. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/ru/nid/209150>
16. *Большов М.А., Курицын Ю.А., Лигер В.В., Мироненко В.Р., Надеждинский А.И., Понуровский Я.Я., Леонов С.Б., Яранцев Д.А.* Измерение параметров нестационарных газовых потоков методом диодной лазерной абсорбционной спектроскопии // *Квантовая электроника.* 2015. Т. 45. № 4. С. 377.
17. NTT Electronics Corporation (NEL). http://www.ntt-electronics.com/en/products/photronics/gas_sensing.html
18. *Волощенко О.В., Зосимов С.А., Иванькин М.А., Колесников О.М., Николаев А.А., Терёшин А.М., Чевагин А.Ф.* Исследование характеристик рабочего процесса в модельной камере сгорания прямоточной силовой установки // *Тр. ЦАГИ.* 2015. Вып. 2736.
19. Sacher Lasertechnik. http://www.sacher-laser.com/home/laser-diodes/distributed_feedback_laser/dfb/single_mode.html
20. *Leonov S.B., Firsov A.A., Yarantsev D.A., Bolshov M.A., Kuritsyn Yu.A., Liger V.V., Mironenko V.R.* Temperature Measurement in Plasma-Assisted Combustor by TDLAS // *AIAA Paper 2012–3181.* 2012.
21. *Филиппов А.И., Ахметова О.В., Родионов А.С.* Температурное поле турбулентного потока в скважине // *ТВТ.* 2013. Т. 51. № 2. С. 277.
22. *Закиров И.М., Заляиева Ф.Ф., Тухватуллин Р.С., Аиранов Т.А.* Определение температуры плазмы в колеблющейся дуге // *ТВТ.* 2013. Т. 51. № 6. С. 820.
23. *Аскарова А.С., Мессерле В.Е., Устименко А.Б., Боленова С.А., Максимов В.Ю., Габитова З.Х.* Численное моделирование горения пылеугольного топлива в камере сгорания энергетического котла // *ТВТ.* 2015. Т. 53. № 3. С. 467.
24. *Teichert H., Fernholz T., Ebert V.* Simultaneous in Situ Measurement of CO, H₂O, and Gas Temperatures in a Full-Sized Coal-Fired Power Plant by Near-Infrared Diode Lasers // *Appl. Opt.* 2003. V. 42. P. 2043.