ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
Т. 56, № 6 ФИЗИКА 2013

ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535.34, 539.194

О.К. ВОЙЦЕХОВСКАЯ, Д.В. ВОЛКОВ, Д.Е. КАШИРСКИЙ

МЕТОДИКА ЛАЗЕРНОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЯ[1]

Описана инженерная методика определения термодинамических параметров высокотемпературного газового объема на примере водяного пара. Подход заключается в точном расчете ослабления газовым объемом интенсивности нескольких линий генерации лазера для фиксированных интервалов температуры и парциального давления с последующей аппроксимацией функции пропускания от термодинамических параметров среды. Найденные коэффициенты полиномов использованы в решении обратной задачи газоанализа, когда парциальное давление газовых составляющих среды и ее температура объявляются неизвестными. Методика пригодна для одновременного дистанционного контроля за температурой (от 400 до 1600 K) и парциальным давлением (от 0,025 до 0,2 атм) газа при ошибке их определения не более 10 %.

Ключевые слова: *двигатель, функция пропускания, температура, парциальное давление, водяной пар, лазер.*

Введение

Диагностика двигателей подразумевает целый комплекс мероприятий на различных этапах конструкторской проработки изделий и испытаний. Применяя методы диагностики в задаче аварийной защиты двигателей, возможно выявление и предупреждение различных неисправностей в узлах и агрегатах двигателей, которые могут привести к нарушению работоспособности или полному отказу двигателя. Необходимость раннего обнаружения неисправности в двигателе обуславливается тем, что своевременное предупреждение развития аварийных ситуаций позволяет сохранить не только сам двигатель, но и предотвратить разрушения стендовых сооружений, пусковых установок или катастрофы носителя двигателя в целом. Поисковые исследования методов и средств дистанционной диагностики двигателей привели к необходимости анализа их функционирования по спектральным излучательным (поглощательным) характеристикам выхлопов двигателей высокочувствительными фотоприемными устройствами ИК-диапазона, так как оптико-физические методы в силу малой инерционности имеют преимущество по скорости реагирования на возникающие аварийные ситуации в двигателях.

Дистанционное обнаружение неполадок заключается в детектировании характеристик поглощения (излучения) газовых компонентов выхлопа двигателя в диапазоне температуры 300–2500 K в определенных спектральных областях. Несмотря на различие в видах топлив, основными газовыми компонентами продуктов сгорания в факеле авиационного двигателя являются оксиды азота, углерода, а также водяной пар и соединения серы (NO, CO, H_2O, CO_2, H_2S, SO_2), при этом изменяются лишь их температура и концентрации [1]. При нормальном функционировании двигателя эти величины варьируют в строго заданных пределах, и выход их значений за эти границы является сигналом о возможных неполадках. Например, сгорание одного литра авиационного керосина приводит к выбросу 1 г серы в атмосферу [2] и по концентрации серосодержащих соединений в выбросе авиационного двигателя можно судить о качестве топлива.

В настоящее время существует значительный ряд работ, посвященных проблеме извлечения значений концентраций газовых компонентов или их температуры из спектральных характеристик поглощения и излучения газовых выхлопов двигателей [3–9]. Неразрушающие оптические методы используются для мониторинга газов и аэрозолей с различными целями, такими, как контроль загрязнения воздуха, исследование атмосферных изменений и т.д. Применяются различные спектроскопические методы для обнаружения газов и измерения их концентраций: фурье-спектроскопия, метод дифференциального поглощения, узкополосная спектроскопия, лазерная спектроскопия.

В работах [10–13] проведен количественный анализ трансформации излучения ИК-диапазона при прохождении через неоднородную газово-аэрозольную среду вследствие комплексного влияния процессов поглощения, переизлучения и рассеяния и выявлены микрофизические свойства

[1] Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, ГК № 14.514.11.4050.

рассеивающих частиц, определяющие необходимость совместного учета молекулярного поглощения и аэрозольного рассеяния. В итоге выполнения этих работ предложены:

а) пирометрический метод определения усредненной по трассе температуры нагретой газовой среды по ее спектральному излучению в случае неопределенной концентрации излучающего газа [10];

б) метод дистанционного определения суммарной по трассе концентрации молекулярных газов в температурно-неоднородных газовых средах по измерению прозрачности на участках с минимальной температурной зависимостью коэффициента поглощения [11];

в) способ определения малых концентраций высокотемпературных газов из разности показаний датчиков, принципы действия которых основаны на контактном и дистанционном методах измерения температуры газовой смеси [12];

г) инженерная методика определения термодинамических параметров высокотемпературного однокомпонентного газа из значения интенсивности излучения, поступившего на фотоприемник [13]. Методика базируется на предварительном точном определении интенсивности излучения для конкретного спектрального диапазона и фиксированных интервалов температуры и концентрации газа. Последнее осуществлено теоретическим расчетом на примере угарного газа.

Перспективность применения лазеров в решении рассматриваемой проблемы показана в работах [14–21]. Для ряда молекулярных ИК-лазеров вычислены и сопоставлены количественные параметры, характеризующие чувствительность и селективность детектирования конкретного газа. Разработаны алгоритмы и компьютерные программы, предназначенные для оптимизации выбора аналитических лазерных частот, пригодных для спектроскопического газоанализа смесей. Определены аналитические частоты для обнаружения примесей H_2O, CO_2, N_2O, CO, NO, SO_2, NO_2, NH_3, HNO_3, OH, H_2CO, HCN, H_2O_2, H_2S, HO_2, C_2H_4, C_2H_2, NO^+ с помощью спектроскопической базы данных высокого разрешения HITRAN и C_6H_6, C_7H_8, p-C_8H_{10}, C_3H_4O с помощью атласа спектров низкого разрешения. Проведено сравнение детектирующих возможностей CO_2- и CO-лазеров при ИК-диагностике газов, содержащихся в выхлопе самолетного двигателя и продемонстрировано, что широкодиапазонный CO-лазер (одновременная генерация на фундаментальных (ΔV = 1, λ = 4,9 – 7,5 мкм) и обертонных (ΔV = 2, λ = 2,5–4,2 мкм) переходах) имеет уникальные возможности в количественном спектроскопическом газоанализе многокомпонентных смесей.

Были выполнены расчеты коэффициентов поглощения в среде выхлопа двигателя на частотах излучения CO_2-лазера и широкодиапазонного CO-лазера. Отметим, что основной вклад в поглощение в данной спектральной области обусловлен H_2O и CO_2. Многие лазерные частоты CO имеют очень низкое поглощение во влажном загрязненном воздухе (значительно ниже, чем лазерные частоты CO_2). Некоторые другие частоты CO, наоборот, обладают очень большим поглощением. Данное обстоятельство является преимуществом широкодиапазонных CO-лазеров, делающим их многофункциональными устройствами. Они могут применяться не только для мониторинга загрязнений в окнах прозрачности атмосферы, но также и для обнаружения очень малых концентраций водяного пара и углекислого газа.

Эти результаты нуждаются в ревизии, поскольку требуется анализ влияния ширины лазерной линии, и произошло обновление значений параметров спектральных линий в БД HITRAN. В работе [22] показано, что в таком случае возможны значительные погрешности в расчетах коэффициентов поглощения газов. В первую очередь это связано с тем, что БД HITRAN содержит параметры спектральных линий для нормальной температуры (296 К), в то время как выхлопы двигателей имеют температуру в широком диапазоне (500–3000 К и выше). Поскольку с ростом температуры газовой смеси заселяются все более высокие уровни, то линии поглощения с нижних уровней становятся малоинтенсивными, и наибольший вклад в поглощение дают линии переходов между высоко возбужденными уровнями.

В работе [23] развит метод абсорбционной спектроскопии с диодными лазерами для бесконтактного измерения температуры и давления газовой смеси в нестационарных условиях при малых отношениях сигнал/шум. Метод основан на регистрации спектров поглощения молекул воды и аппроксимации их спектрами, симулированными на основе спектроскопических баз данных. Обнаружено, что аппроксимация экспериментальных данных симулированным спектром дает более правильные данные о температуре смеси по сравнению с подгонкой индивидуальными контурами. Разработанная методика регистрации и обработки спектров использована для определения температуры, концентрации паров воды и полного давления в нестационарных условиях горения смеси воздух – водород, но не может служить инженерной в связи со стационарностью установки.

1. Описание схемы методики

В данной работе предлагается методика одновременного определения температуры и парциального давления нагретого водяного пара методом абсорбционной спектроскопии по ослаблению лазерного излучения. Суть метода заключается в определении параметров среды из измеряемой функции пропускания по заранее рассчитанной теоретической зависимости функции пропускания от температуры θ и парциального давления газа ρ. Подобная методика для определения термодинамических условий нагретого газового объема по интенсивности излучения в широкополосном варианте ранее изложена авторами в [13].

Выбор водяного пара в качестве поглощающего газа обуславливается тем, что он является одним из основных продуктов сгорания и имеет хорошо изученный спектр. В качестве предполагаемого источника излучения был взят CO-лазер, так как он способен работать в непрерывном режиме и выдавать большие плотности мощности порядка 100 Вт/см^2.

На рис. 1 приведена блок-схема получения пригодных для решения обратной задачи (определения θ и ρ) теоретических зависимостей функции пропускания от температуры и парциального давления. Результат выполнения каждого шага процесса проходит проверку на соответствие заранее заданным критериям. Например, одним из таких критериев является точность аппроксимации. Переход на следующий шаг происходит при соответствии результата шага критериям.

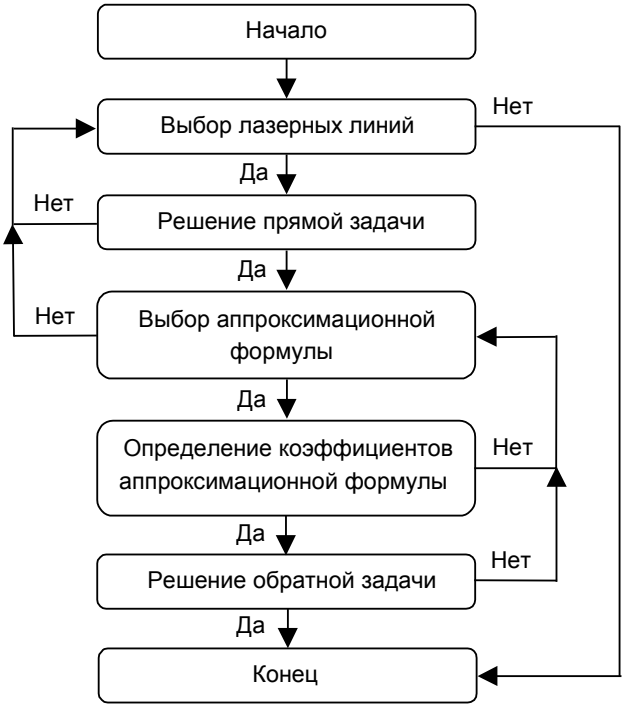

Рис. 1. Блок-схема получения теоретических зависимостей функции пропускания от θ и ρ

Таким образом, проведя измерения функции пропускания и воспользовавшись полученными аппроксимационными соотношениями, определяем искомые термодинамические характеристики газовой среды.

2. Решение прямой задачи и выбор аппроксимационной формулы

Предварительно был проведен анализ спектров H_2O и лазерных переходов с высоковозбужденных уровней молекулы CO на совпадение центров линий. В ходе этой работы выбраны три линии генерации CO-лазера с центрами: 1889,3862 см$^{-1}$ (1→0 P54), 1883,8676 см$^{-1}$ (1→0 P55), 1937,226 см$^{-1}$ (8→7 P6). На рис. 2 приведены результаты расчетов значений функции пропускания водяного пара для выбранных лазерных линий в широком диапазоне температуры (от 400 до 1600 K с шагом 100 K) и парциального давления H_2O (от 0,025 до 0,2 атм с шагом 0,025 атм).

Этот массив данных использовался в качестве исходных значений для получения коэффициентов двух вариантов аппроксимационных соотношений.

В первом варианте строилась зависимость функции пропускания от температуры и парциального давления газа, для чего использовалась полиномиальная формула, приведенная в [13]:

$$T(\rho,\theta)=\sum_{i=0}^{n}\left(\sum_{j=0}^{n}a_{ij}\rho^{j}\right)\theta^{i}\,, \tag{1}$$

где a_{ij} – коэффициенты; ρ – парциальное давление; θ – температура.

Значения коэффициентов полиномов не приводятся, так как они индивидуальны для конкретных линий, а цель данной работы заключается в формулировке общей схемы методики, а также в оценке погрешности параметризации функции пропускания и точности определения термодинамических характеристик среды.

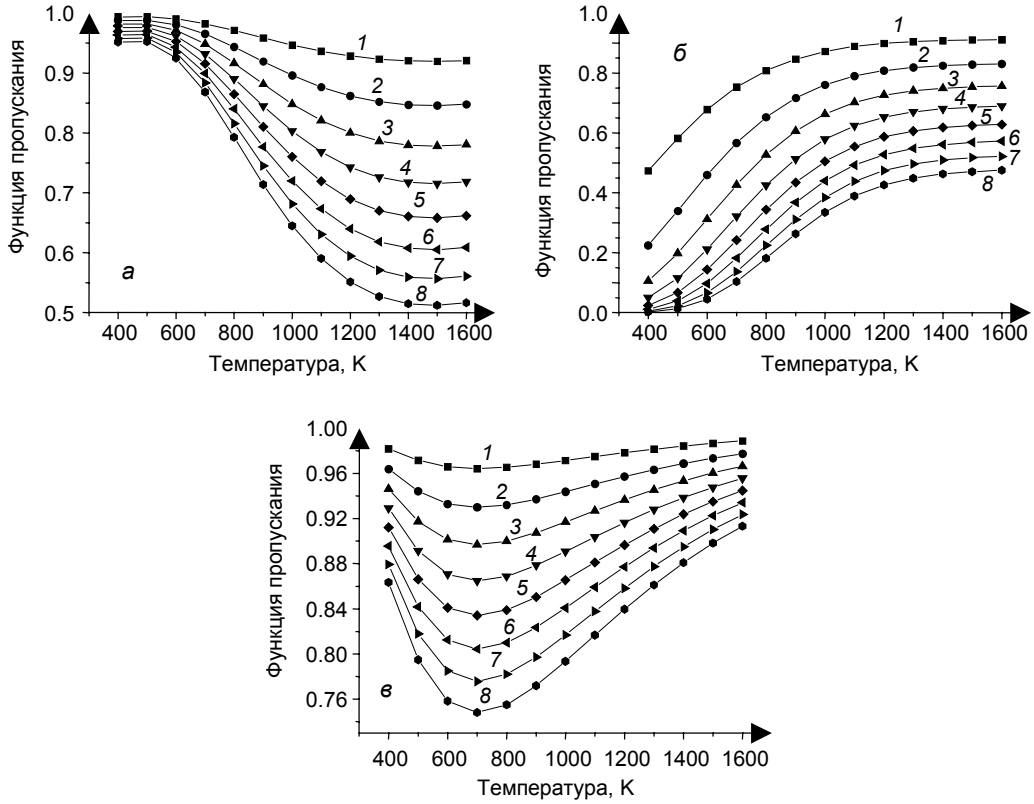

Рис. 2. Зависимость функции пропускания на лазерной линии (*а* – 1883,8676 см$^{-1}$; *б* – 1889,3862 см$^{-1}$; *в* – 1937,226 см$^{-1}$) от температуры и парциального давления H_2O: кр. *1* – 0,025 атм, кр. *2* – 0,05 атм, кр. *3* – 0,075 атм, кр. *4* – 0,1 атм, кр. *5* – 0,125 атм, кр. *6* – 0,15 атм, кр. *7* –0,175 атм, кр. *8* – 0,2 атм

Второй вариант аппроксимации принципиально отличается от первого. Произведена аппроксимация обратных зависимостей, т.е. температура и парциальное давление параметризовались функцией пропускания. Для каждой линии генерации CO-лазера формировались две системы уравнений (одна для температуры, другая для парциального давления), состоящих из следующих уравнений:

$$\begin{aligned}\theta_{\rho_j}&=\sum_{i=0}^{4}a_{ij}T^{i},\\ \rho_{\theta_k}&=\sum_{i=0}^{2}b_{ik}T^{i},\end{aligned} \tag{2}$$

где ρ и θ – соответственно парциальное давление и температура водяного пара; a_{ij}, b_{ik} – коэффициенты полиномов; T – функция пропускания; j и k – номера уравнений. Количество уравнений, входящих в системы для температуры и парциального давления, определяется соответственно числом значений парциального давления и температуры, участвующих в прямой задаче.

3. Выбор максимальной степени полинома

Полином (1) предназначен для решения обратной задачи по определению температуры выхлопа и парциального давления одного из компонентов газового облака (H_2O), и естественно, чем ниже степень полинома, тем проще алгоритм. Для определения минимального значения степени полинома было проведено сравнение стандартного отклонения относительных ошибок при аппроксимации полиномами 3-й, 4-й и 5-й степени зависимостей функции пропускания от термодинамических характеристик для трех выбранных линий генерации лазера (табл. 1). Стандартное отклонение относительных ошибок находилось по формуле вида

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(\left(T_i^{\text{рас}} - T_i^{\text{исх}}\right)\Big/T_i^{\text{исх}}\right)^2}{N-M}} \cdot 100\%,$$

где $T_i^{\text{исх}}$ и $T_i^{\text{рас}}$ – исходное и рассчитанное по формуле (1) значение функции пропускания; N – число участвующих в обработке значений функции пропускания; M – число определяемых параметров.

Таблица 1

Стандартное отклонение относительных ошибок, %

Центр лазерной линии, см$^{-1}$		1889,38620	1883,86760	1937,22600
Степень полинома	3	36,78	9,59	0,27
	4	206,59	2,79	0,32
	5	74,22	2,53	0,31

В ходе сравнения выяснилось, что для линии 1883,8676 см$^{-1}$ аппроксимация функции пропускания полиномом 4-й степени более корректна, чем полиномом 3-й степени. А вот сравнение полиномов 4-й и 5-й степени показало, что их точности аппроксимации практически не отличаются, и для этой линии достаточно ограничиться 4-й степенью полинома. Для линии 1889,3862 см$^{-1}$ погрешность аппроксимации функции пропускания полиномами 3-й, 4-й и 5-й степени слишком большая, что объясняется перекрыванием нескольких линий поглощения на этой лазерной линии, и поэтому ее из рассмотрения исключили. Для линии 1937,226 см$^{-1}$ точность аппроксимации функции пропускания практически не меняется с увеличением степени полинома.

4. Критерии выбора лазерных линий

Различные величины погрешности в восстановлении функции пропускания на трех линиях показывают необходимость предварительного анализа спектра поглощения исследуемого газа. На рис. 3–5 показаны зависимости отношения изменения функции пропускания к изменению парциального давления и температуры.

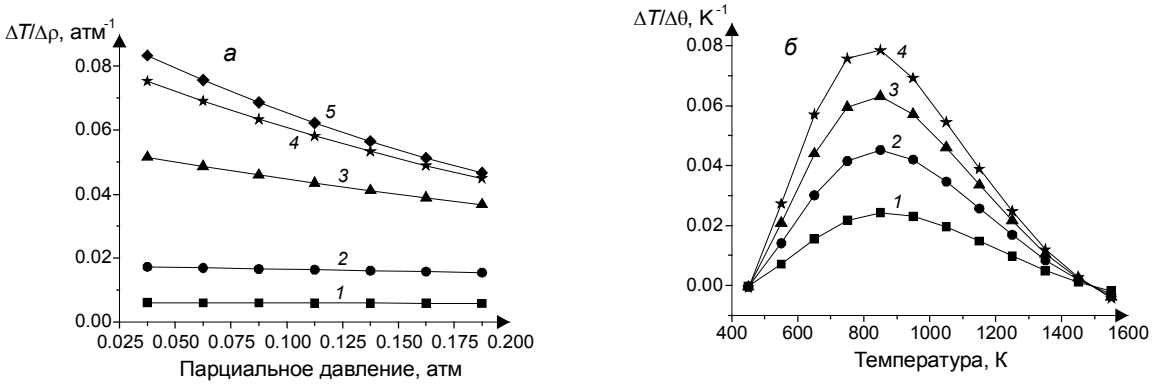

Рис. 3. Зависимости отношения изменения функции пропускания к изменению: *а* – парциального давления (кр. *1* – 400 К, кр. *2* – 700 К, кр. *3* – 1000 К, кр. *4* – 1300 К, кр. *5* – 1600 К) и *б* – температуры (кр. *1* – 0,05 атм, кр. *2* – 0,1 атм, кр. *3* – 0,15 атм, кр. *4* – 0,2 атм) для лазерной линии 1883,8676 см$^{-1}$

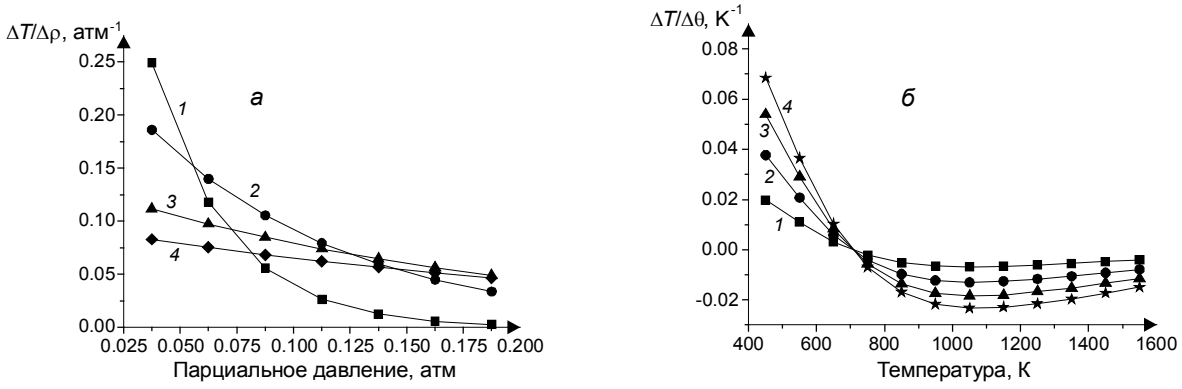

Рис. 4. Зависимости отношения изменения функции пропускания к изменению: *а* – парциального давления (кр. *1* – 400 К, кр. *2* – 700 К, кр. *3* – 1000 К, кр. *4* – 1600 К) и *б* – температуры (кр. *1* – 0,05 атм, кр. *2* – 0,1 атм, кр. *3* – 0,15 атм, кр. *4* – 0,2 атм) для лазерной линии 1889,3862 см$^{-1}$

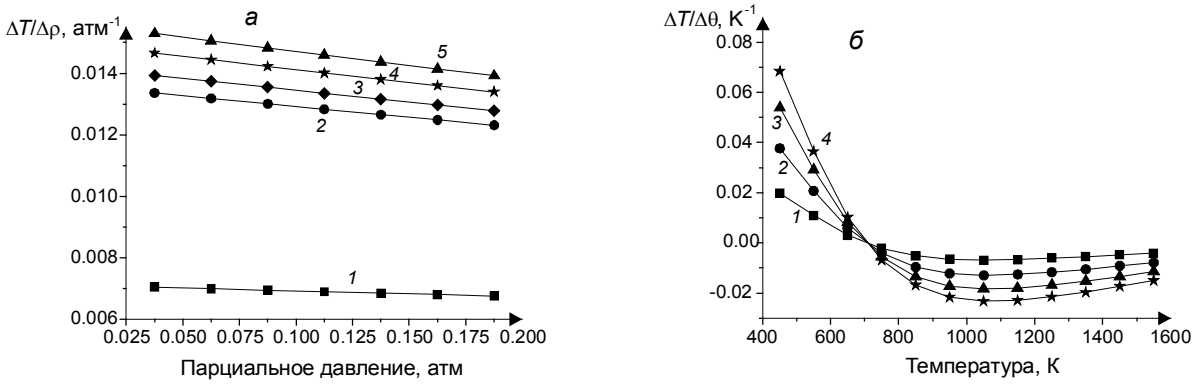

Рис. 5. Зависимости отношения изменения функции пропускания к изменению: *а* – парциального давления (кр. *1* – 400 К, кр. *2* – 700 К, кр. *3* – 1000 К, кр. *4* – 1300 К, кр. *5* – 1600 К) и *б* – температуры (кр. *1* – 0,05 атм, кр. *2* – 0,1 атм, кр. *3* – 0,15 атм, кр. *4* – 0,2 атм) для лазерной линии 1937,226 см$^{-1}$

Видно, что зависимости на рис. 4 имеют нерегулярное поведение, чем и объясняется сложность аппроксимации функции пропускания для лазерной линии 1889,3862 см$^{-1}$.

Из рис. 6 видно, что при высоких температурах вклад соседних линий, которыми можно было пренебречь при температурах 400–600 К, становится соизмерим с вкладом рассматриваемой линии поглощения и может даже превысить его.

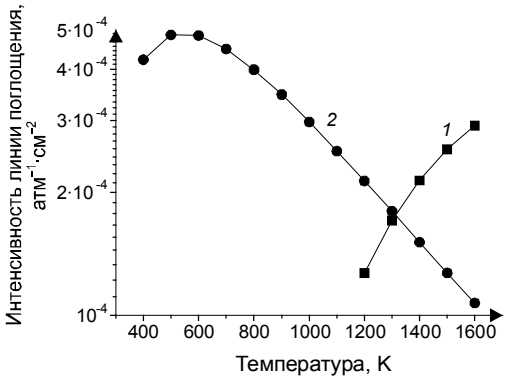

Рис. 6. Зависимости интенсивностей линий поглощения от температуры в логарифмическом масштабе (расстояние от линии поглощения до центра лазерной линии 1937,226 см$^{-1}$: кр. *1* – 0,09502 см$^{-1}$, кр. *2* – 0,00571 см$^{-1}$)

Исходя из полученных результатов, можно сформулировать критерии выбора лазерных линий для дистанционного контроля высокотемпературных газовых сред. Во-первых, центр лазерной линии должен приходиться на спектральный диапазон, в котором мощность регистрируемого излучения сравнима или выше пороговой мощности ФПУ. Во-вторых, минимальное расстояние между соизмеримыми по интенсивностям линиями должно превышать удвоенное значение спектральной ширины большей по интенсивности линии во избежание эффекта перекрывания линий.

5. Влияние спектральной ширины лазерной линии

Из-за нестабильности генерации СО-лазера величина спектральной ширины лазерной линии может меняться, поэтому существует необходимость учета этого параметра в рассматриваемой

задаче. Был проведен расчет функции пропускания с вариацией спектральной ширины лазерной линии в заданных интервалах температуры (от 400 до 1600 K) и парциального давления (от 0,025 до 0,2 атм), причем спектральная ширина менялась от 0,0035 см$^{-1}$, что соответствует доплеровской ширине при рабочих температурах CO-лазера (77–100 K) до 0,035 см$^{-1}$. В табл. 2 показано процентное отклонение функции пропускания при различных значениях спектральной ширины линии генерации лазера от первоначального значения, рассчитанного при спектральной ширине лазерной линии 0,0035 см$^{-1}$.

Таблица 2

Влияние спектральной ширины лазерной линии на значение функции пропускания

Центр линии, см$^{-1}$	Ширина линии, см$^{-1}$	Отклонение функции пропускания, %
1883,8676	0,0035	0
	0,015	2,77
	0,025	6,68
	0,035	10,39
1937,226	0,0035	0
	0,015	0,32
	0,025	0,75
	0,035	1,17

6. Решение обратной задачи

В первом варианте аппроксимации процедура определения ρ и θ сводится к решению системы двух нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ)

$$\begin{cases} f_1(\rho,\theta) = T_1, \\ f_2(\rho,\theta) = T_2, \end{cases}$$

где $f_1(\rho,\theta)$ и $f_2(\rho,\theta)$ – полиномы вида (1) для двух лазерных линий; T_1 и T_2 – измеренные значения функции пропускания. Математические аспекты решения обратной задачи подробно обсуждены в предыдущей работе по этой теме [13].

Решение обратной задачи в случае второго варианта аппроксимации сводится к выполнению следующего условия для систем уравнений:

$$\min\left(f_1(T) - f_2(T)\right),$$

где $f_1(T)$ и $f_2(T)$ – формулы (2) для парциального давления или температуры для двух лазерных линий.

Так как исследование проводится по замкнутой схеме, анализ достоверности решения обратной задачи можно выполнить сравнением исходных и найденных значений. Сравнение погрешностей определения искомых величин в первом и втором варианте аппроксимации приведено на рис. 7 и 8. Видно, что второй вариант аппроксимации показал лучшие результаты определения термодинамических параметров исследуемой газовой среды. Так, например, погрешность опреде-

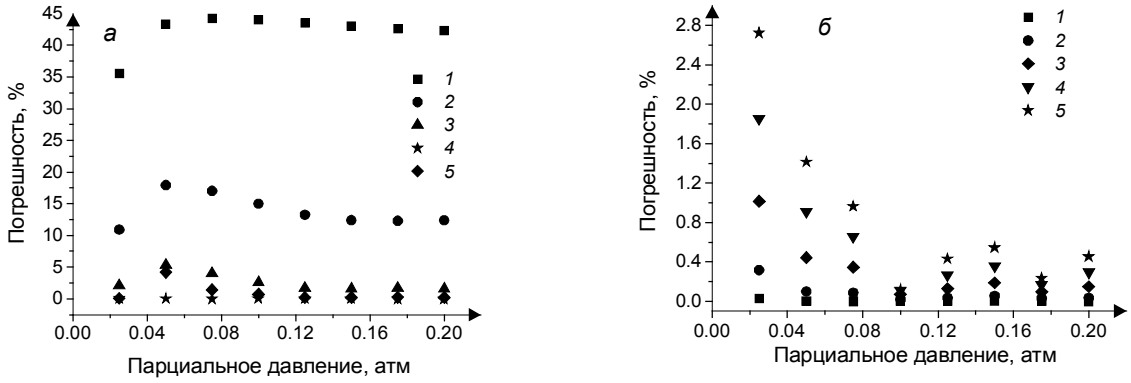

Рис. 7. Погрешность определения давления при различных значениях температуры: *а* – первый вариант аппроксимации (*1* – 400 K, *2* – 500 K, *3* – 600 K, *4* – 1000 K, *5* – 1600 K); *б* – второй вариант аппроксимации (*1* – 400 K, *2* – 800 K, *3* – 1000 K, *4*– 1200 K, *5*– 1600 K)

ления температуры во втором варианте в интервале температуры от 700 до 1600 K не превысила 3,34 %, а максимальная погрешность составила 18,5 %. В первом же варианте точность в 3 раза меньше.

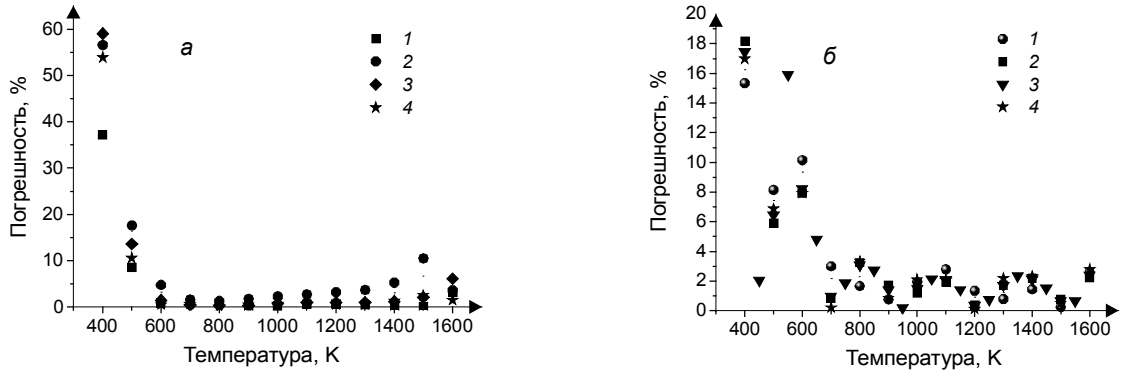

Рис. 8. Погрешность определения температуры при различных значениях парциального давления: *а* – первый вариант аппроксимации (*1* – 0,025 атм, *2* – 0,05 атм, *3* – 0,1 атм, *4* – 0,2 атм); *б* – второй вариант аппроксимации (*1* – 0,025 атм, *2* – 0,075 атм, *3* – 0,1 атм, *4* – 0,2 атм)

Был проведен анализ устойчивости решения обратной задачи с использованием второго варианта аппроксимации при вариации спектральной ширины лазерной линии от 0,0025 до 0,0045 см$^{-1}$, что соответствует доплеровскому уширению при рабочих температурах CO-лазера. Изменение погрешности определения температуры и парциального давления оказалось несущественно (максимальное отклонение составило 0,36 %).

Заключение

В последние годы расчет спектральных характеристик нагретых газовых смесей в основном реализуется по прямой методике (line-by-line), в то время как из-за разных подходов к решению обратной задачи оптических исследований – определению термодинамических параметров неоднородных газово-аэрозольных сред – алгоритмы ее решения имеют множество вариаций. Это связано с особенностями каждой экспериментальной установки, точностью измерений, отношением сигнал/шум и характеристиками регистрирующего устройства.

Предложенная в данной работе математическая модель обеспечивает погрешность определения температуры и парциального давления газа в пределах 5 %. Конечная величина погрешности будет определяться погрешностями измерений (например, типичная точность измерения оптического термометра в интервале температуры 800 –1300 °C составляет ±5 и ±10 °C в интервале температуры 1300–2000 °C [24]). Соответственно при экспериментальной проверке предложенной методики необходимо учитывать случайные и систематические ошибки измерений функции пропускания, кинетической температуры газового потока и концентраций компонентов, и поэтому общая схема методики должна адаптироваться к каждому конкретному эксперименту.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.
2. Schmidt S.C. // Technical report LA-UR-99-2961, OSTI ID 785073. – 1999. – 31 p.
3. Heland J. and Schäfer K. // Atmospheric Environment. – 1998. – V. 32. – No. 18. – P. 3067–3072.
4. Schäfer K., Heland J., Lister D.H., et al. // Appl. Opt. – 2000. – V. 39. – No. 3. – P. 441–455.
5. Schäfer K. // Air & Space Europe. – 2001. – V. 3. – No. 1–2. – P. 104–108.
6. Schäfer K., Wagner P., Emeis S., et al. // Proc. SPIE. – 2012. – V. 8534. – ID 853409. – 10 p.
7. Schäfer K., Jahn C., Sturm P., et al. // Atmospheric Environment. – 2003. – V. 37. – No. 37. – P. 5261–5271.
8. Schäfer K., Brockmann K., Heland J., et al. // Appl. Opt. – 2005. – V. 44. – No. 11. – P. 2189–2201.
9. Schürmann G., Schäfer K., Jahn C., et al. // Atmospheric Environment. – 2007. – V. 41. – P. 103–118.
10. Антипин М.Е., Войцеховская О.К. // Изв. вузов. Физика. – 2001. – Т. 44. – № 4. – С. 3–8.
11. Войцеховская О.К., Антипин М.Е. // Оптика атмосферы и океана. – 2002.– Т. 15. – № 10. – С. 878–882.
12. Войцеховская О.К., Войцеховский А.В., Запрягаев А.Ю. // Изв. вузов. Физика. – 2008. – Т. 51. – № 5. – С. 96–102.

13. Войцеховская О.К., Войцеховский А.В., Каширский Д.Е., Суслова И.С. // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 9. – С. 37–44.
14. Ионин А.А., Климачев Ю.М., Козлов А.Ю. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 8. – С. 702–707.
15. Бузыкин О.Г., Иванов С.В., Ионин А.А. и др. // Оптика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 14. – № 5. – С. 400–407.
16. Buzykin O.G., Ionin A.A., Ivanov S.V., et al. // Proc. SPIE. – 2002. – V. 4644. – P. 193–200.
17. Бузыкин О.Г., Иванов С.В., Ионин А.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физич. – 2002. – Т. 66. – № 7. – С. 962–967.
18. Ivanov S.V., Ionin A.A., Kotkov A.A., et al. // Proc. SPIE. – 2003. – V. 5149. – P. 161–168.
19. Иванов С.В., Ионин А.А., Котков А.А. и др. // Химическая физика. – 2004. – Т. 23. – № 8. – С. 62–70.
20. Buzykin O.G., Ivanov S.V., Ionin A.A., et al. // J. Rus. Laser Res. – 2005. – V. 26. – No. 5. – P. 402–426.
21. Ivanov S.V. // Phys. Wave Phenom. – 2007. – V. 15. – No. 1. – P. 57–65.
22. Voitsekhovskaya O.K., Volkov D.V., Kashirskii D.E., and Korchikov V.S. // Quant. Electron. – 2012. – V. 42. – No. 7. – P. 634–639.
23. Большов М.А., Курицын Ю.А., Лигер В.В., Мироненко В.Р. // Опт. и спектр. – 2011. – Т. 110. – № 6. – С. 900–908.
24. Instrumentation Reference Book / ed. by Walt Boyes. – Oxford: Elsevier Inc., 2010. – 929 p.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: vok@elefot.tsu.ru

Поступила в редакцию 03.06.13.

Войцеховская Ольга Кузьминична, д.ф.-м.н., профессор;
Волков Дмитрий Владимирович, студент;
Каширский Данила Евгеньевич, аспирант.