01

Определение оптимального набора линий поглощения для измерения максимальной температуры в пространственно неоднородной газовой среде методом абсорбционной спектроскопии с диодными лазерами

© В.Р. Мироненко, В.В. Лигер, Ю.А. Курицын, М.А. Большов¶

Институт спектроскопии РАН,
Троицк, Москва, Россия
e-mail: ¶mbolshov@mail.ru

Поступила в редакцию 22.04.2025 г.
В окончательной редакции 10.10.2025 г.
Принята к публикации 30.10.2025 г.

Определение максимальной температуры в пространственно неоднородной газовой среде методом абсорбционной спектроскопии с диодными лазерами является нетривиальной задачей. В неоднородной среде контур линии поглощения тестовой молекулы является результирующим по всей трассе зондирования, что увеличивает число параметров, необходимых для теоретической аппроксимации контура линии. В статье рассматривается важный для диагностики горячих сред случай, когда требуется определение не точного профиля распределения температуры, а определение только ее максимального значения. Определен минимальный набор линий поглощения, с помощью которых можно оценить максимальную температуру в предположении трапециевидного ее распределения в среде вдоль линии зондирования. Найдены комбинации из четырех линий, позволяющие оценить максимальную температуру. Предложен метод подгонки формы линии двумя фойгтовскими контурами. Показано, что в случае регистрации минимальной температуры на границе горячей зоны с помощью коммерческих термопар можно ограничиться регистрацией трех линий поглощения.

Ключевые слова: абсорбционная спектроскопия, диагностика горячих зон, неоднородное распределение температуры, аппроксимация контуров линий поглощения.

DOI: 10.61011/OS.2025.11.62167.7866-25

Введение

Метод абсорбционной спектроскопии с диодными лазерами (ДЛАС) является одним из наиболее широко используемых методов лазерной спектроскопии для диагностики газовых сред [1–4]. Важнейшим достоинством лазерных методов является невозмущающий режим получения информации о параметрах диагностируемой среды. Например, при определении температуры горячих газовых объектов и особенно горячих потоков газа невозможно использовать традиционные термопары, поскольку введение любого физического объекта в исследуемую область существенно изменяет тепловые поля и структуру потоков в окрестности введенного тела, а следовательно, искажает результаты измерений. Напротив, луч малоинтенсивного диодного лазера (ДЛ) никак не влияет на свойства диагностируемой среды, что обеспечивает правильность результатов диагностики.

Вторым важным достоинством методов, использующих ДЛ, является возможность диагностики удаленных объектов или „опасных“ для персонала зон, например зон горения или зон ядерных реакций. Излучение ДЛ может быть либо сформировано оптическими системами в виде мало расходящегося пучка и доставлено до объекта, либо доставлено к зондируемому объекту по световодам на достаточно большое расстояние.

Определение температуры среды методом ДЛАС основано на измерении интегрального поглощения на нескольких линиях тестовой молекулы, имеющих различные нижние уровни переходов. При термодинамическом равновесии (ТДР) в среде отношения интегральных интенсивностей линий поглощения тестовой молекулы подчиняются закону Больцмана и определяются температурой среды. При давлении газа больше ~ 0.1 atm ТДР устанавливается за время порядка 10^{-4-5} s. Характерные времена изменения плотности и температуры в высокоскоростных газовых потоках современных авиационных двигателях ($> 10^{-4}$ s) позволяют использовать модель ТД-равновесия в среде, и метод ДЛАС позволяет корректно определять динамику изменения температуры смеси с временным разрешением не хуже $\sim 10^{-3}$ s.

Разработаны два варианта метода ДЛАС. Первый основан на измерении прямого поглощения зондирующего излучения. Этот метод хорошо работает при больших отношениях сигнал/шум. При высоком уровне шумов лучше работают различные варианты модуляционной спектроскопии, при которых модулируется частота излучения зондирующего диодного лазера, а поглощение регистрируется на гармониках частоты модуляции. Воз-

можности метода ДЛАС как в режиме измерения прямого поглощения, так и с использованием различных вариантов модуляционной спектроскопии успешно продемонстрированы в большом числе работ и обзоров [2–11].

Чаще всего в качестве тестовой молекулы используют молекулу H_2O, для которой разработаны хорошие базы спектроскопических параметров (положение центра линии поглощения, сечения поглощения, сечения столкновительных уширений). Выбор молекулы H_2O в качестве тестовой молекулы определялся тем, что для диагностики процессов горения в до- и сверхзвуковых потоках концентрация паров воды в зоне горения является важнейшим параметром, характеризующим эффективность использования топлива, поскольку в процессе горения углеводородные компоненты топлива превращаются в водяной пар. Кроме того, существует богатая линейка разработанных для телекоммуникационных задач диодных лазеров для ИК диапазона ($0.9-3\,\mu$m), в котором расположены достаточно сильные линии поглощения молекулы H_2O.

Также успешно для диагностики параметров газа используется молекула CO_2, которая также продуцируется в большом объеме в процессе горения [12]. У этой молекулы имеются сильные линии поглощения в диапазоне выше $2.7\,\mu$m. Выбор авторами молекулы воды для диагностики продиктован исключительно имеющимся в их распоряжении набором достаточно дешевых диодных лазеров с распределенной обратной связью (distributed-feedback — DFB) и фотодетекторов.

Следует отметить, что большинство разработанных вариантов ДЛАС хорошо применимы для объектов с однородным распределением температуры, реализуемым в лабораторных печах, сверхзвуковых трубах или специальных модельных объектах. Существенно сложнее становится задача диагностики методом ДЛАС среды с неоднородным распределением температуры и парциального давления поглощающих молекул воды. В реальных силовых установках распределение температуры и концентрации всегда неоднородно хотя бы из-за краевых пристеночных эффектов в камерах сгорания. Способ восстановления профиля температуры и концентрации в таких системах является важнейшей и до конца не решенной проблемой.

Самым общим подходом к решению задачи восстановления профиля является томографический метод, хорошо разработанный для рентгеновской компьютерной томографии. Практически этот метод был продемонстрирован на примере специальных лабораторных объектов типа ламинарного пламени газовой горелки [13,14]. Однако в камерах сгорания до настоящего времени томографический метод не применялся и вряд ли может быть применен из-за малого объема камер и невозможности ввести в такой объем большое число пересекающихся в перпендикулярном направлении зондирующих лазерных лучей.

Для диагностики таких объектов обычно используют только два окна небольшого размера — для ввода и вывода излучения, и задача восстановления профиля формулируется в геометрии line-of-sight, т.е. восстановление профиля по интегральным измерениям поглощения на всей трассе зондирующего луча. При прохождении зондирующего луча ДЛ через неоднородную среду контур линии поглощения тестовой молекулы является результирующим по всей трассе зондирования, включая и путь от источника излучения до объекта и от объекта до детектора. Если для определения температуры однородной среды достаточно измерить интегральное поглощение двух линий, имеющих разные энергии нижних уровней перехода, то в неоднородной среде в геометрии line-of-sight возрастает число параметров, необходимых для характеризации объекта, что требует увеличения числа регистрируемых линий поглощения. Следует отметить, что наиболее надежные DFB диодные лазеры могут быстро перестраиваться по частоте в сравнительно узком диапазоне. Поэтому необходимость измерять интенсивности большого набора линий поглощения тестовой молекулы неизбежно приводит к увеличению числа используемых диодных лазеров, а следовательно, к увеличению стоимости ДЛАС-сенсора и усложнению процедуры обработки экспериментальных спектров.

Для разработчиков новых авиационных двигателей наиболее важным параметром является максимальная температура зоны горения, которая определяет эффективность использования топлива. При этом точное определение закона распределения температуры в различных зонах горения не является критически важным. При такой постановке задачи диагностику среды можно проводить по меньшему числу линий поглощения.

Целью настоящей работы является определение минимального набора линий поглощения, необходимых для оценки максимальной температуры пространственно неоднородной газовой среды в однолучевой геометрии line-of-sight.

Выбор линий поглощения

Постановка задачи

В реальной диагностике горячего объекта экспериментально измеряются интенсивности и контуры выбранных линий поглощения тестовой молекулы, проводится подгонка экспериментальных контуров теоретически симулированными на основе спектроскопических баз данных и определяется температура в процессе подгонки экспериментальных контуров всех линий.

Как отмечалось выше, для решения задачи восстановления профиля температуры неоднородной среды необходимы измерения поглощения на значительно большем числе линий тестовой молекулы [15,16]. Это автоматически увеличивает число переменных и существенно усложняет не только конструкцию ДЛАС-сенсора, но и математический алгоритм подгонки экспериментальных спектров теоретическими, поскольку решение обратной

Таблица 1. Нижние уровни переходов и частоты центров линий

Номер	1	2	3	4	5	6	7	8
E'', cm^{-1}	23.8	79.5	136.8	173.4	224.8	447.3	586.2	744.2
ν_c, cm^{-1}	7294.1	7306.7	7327.7	7343.8	7339.8	7368.4	7381.6	7393.8
Номер	9	10	11	12	13	14	15	16
E'', cm^{-1}	782.4	1045.1	1327.1	1557.8	1806.7	2073.5	2660.9	2981.4
ν_c, cm^{-1}	7420.	7185.6	7426.14	7435.6	7444.37	7452.41	7466.33	6836.67

задачи восстановления пространственного профиля становится неустойчивым.

Подробное исследование вопроса о количестве необходимых линий для восстановления произвольного распределения температуры в зондируемом объекте было проведено в [17,18]. В основу исследования положен теоретический анализ восстановления распределения температуры в зондируемом объекте по интегральным поглощениям линий с известными энергиями нижних уровней переходов E''. Оказывается, максимально корректного восстановления температурного распределения можно достигнуть, если применить регистрацию 14–15 равномерно распределенных по энергии E''-линий.

Существенный интерес для разработчиков новых двигателей представляет не столько восстановление реального пространственного профиля зоны горения, а определение максимальной температуры в неоднородной среде. При этом возможно допущение более простого трапециевидного распределения температуры с максимальной квазипостоянной температурой в центральной части объекта и линейным спадом температуры к его краям. В наших экспериментах в Центральном Аэро-Гидродинамическом Институте имени Жуковского (ЦАГИ) подобный профиль реализовывался на испытательном стенде. Подобное распределение рассматривалось и в работе [19]. Такая упрощенная, но практически важная модель неоднородной среды позволяет уменьшить число линий, необходимых для оценки максимальной температуры в газовом объекте до четырех линий по числу неизвестных, варьируемых при подгонке параметров: максимальная и минимальная температуры, концентрация молекул и пространственная доля спадающей части в трапеции.

Для определения максимальной температуры при ее трапециевидном распределении мы разработали специальную модификацию метода прямого поглощения без модуляции, который позволил регистрировать поглощение ниже 10^{-2} на фоне сильных шумов. Целью настоящей работы является описание алгоритма выбора оптимального набора линий поглощения для определения максимальной температуры газового объекта и оценка ошибки определения этой температуры для различных вариантов набора линий. Разработка новых устройств и экспериментальная проверка разработанного нового варианта ДЛАС-сенсора являются предметом отдельной публикации.

Расчет оптимальных наборов линий поглощения

Была создана программа выбора оптимальных линий поглощения молекул воды, обеспечивающих минимальную ошибку определения максимальной температуры в неоднородной среде. Отбор линий осуществлялся в следующей последовательности. Сначала в интервале длин волн $1.3-1.6\,\mu\mathrm{m}$ выбирались наиболее сильные линии с энергиями нижних уровней в диапазоне от 0 (основное состояние молекулы H_2O) до $3000\,\mathrm{cm}^{-1}$. Выбор линий основывался на двух критериях: минимизация влияния соседних слабых линий и максимальная интегральная интенсивность. Выбор осуществлялся на основе базы данных HITRAN-2020. Выбранные таким образом 16 линий приведены в табл. 1.

Затем из этих 16 линий составлялись произвольные комбинации из 4 линий, всего 933 варианта. Используя произвольные четыре линии, можно восстановить максимальную температуру с той или иной точностью. Для определения оптимального набора линий, обеспечивающего наилучшую точность, мы провели численный эксперимент, при котором параметры среды задавались и решением обратной задачи определялись эти параметры. Критерием оптимальности выбора была минимальная ошибка восстановления заданных априори параметров. В расчетах использовали следующую модель объекта: оптическая длина 12 cm, из которых 10 cm — участок с постоянной максимальной температурой, 2 cm — линейный спад до минимальной температуры окошек в тестовой камере (500 K), концентрация паров воды 0.05 atm (5%). Расчеты проводились для двух значений максимальной температуры — 2200 и 1500 K.

Интегральное поглощение линий для выбранной модели объекта определялось с использованием уравнения

$$A_i = S_i(T_1)P_{\mathrm{H_2O}}L_1 + \int_0^{L_2} S_i(T(x))P_{\mathrm{H_2O}}dx, \qquad (1)$$

где A_i $[\mathrm{cm}^{-1}]$ — интегральное поглощение i-й линии, S_i $[\mathrm{cm}^{-2}\mathrm{atm}^{-1}]$ — интегральная интенсивность (сила

линии) i-й линии, отнесенная к тестовой молекуле в атмосфере, T_1 — максимальная температура модели, L_1 — длина участка с максимальной температурой, L_2 — длина участка линейного спада температуры $T(x)$ от максимальной температуры до минимальной и P_{H_2O} — давление тестового газа (atm). Отметим, что A — интегральное поглощение при малой величине поглощения. В противном случае A — интегральная оптическая толщина (absorbance).

На основе базы HITRAN 2020 и уравнения (1) находятся величины интегральных поглощений линий A_i при заданных параметрах модели. К найденным значениям A_i добавляются случайные величины $\sim 10^{-5}\,\mathrm{cm}^{-1}$, моделирующие экспериментальные шумы (белый шум с SNR порядка сотни), и решается обратная задача восстановления параметров модели по следующему алгоритму.

Варьируя параметры ($T_{\max}$, $T_{\min}$, L_2, концентрация), рассчитываются текущие интегральные поглощения четырех линий A_i. Методом нелинейных наименьших квадратов находится наилучшее совпадение найденных параметров модели с априори заданными. Наличие добавленных „шумов“ приводит к ошибкам в определении параметров модели. Результаты этих расчетов для двух значений максимальной температуры приведены в табл. 2, 3. На основе этих расчетов из 933 комбинаций линий выбраны пять комбинаций, обеспечивающих минимальную ошибку. В приведенных ниже таблицах температура, полученная в результате описанной процедуры, обозначена T_{cal}.

Следует отметить, что выборы оптимальных наборов линий для максимальных температур 1500 и 2200 K близки. Среднеквадратичная ошибка определения максимальной температуры меняется незначительно для различных наборов линий. При диагностике пламени в стационарных горелках часто считают, что в отличие от ситуации в камерах сгорания концентрация паров воды пропорциональна температуре. В этом случае подгонка экспериментов с помощью модели с постоянной концентрацией паров воды занижает оценку температуры примерно на 40 K.

Наличие коммерческих датчиков температуры на стенке может позволить определить реальную низкую температуру (например, 500 K). Тогда для определения максимальной температуры достаточно трех линий (трех лазеров). Для этого случая оптимальные наборы линий приведены в табл. 4, 5.

Из анализа данных, приведенных в табл. 1–5, следует, что во всех случаях для минимизации ошибки определения высокой температуры необходимо использовать линии как с низкой, так и с высокой энергией нижних уровней. Максимальное поглощение на некоторых из этих линий в модельном объекте не превышает 10^{-2} при типичной концентрации паров воды 0.05 atm (5%) и температуре 2200 K. Это означает, что для практической реализации возможного алгоритма восстановления профиля необходимо обеспечить измерение поглощений в условиях сильных помех на уровне порядка 10^{-3}.

Таблица 2. Ошибка (σ(K)) определения максимальной температуры 2200 K для пяти комбинаций линий, номера линий из табл. 1

T_{cal}	σ (K)	Комбинация линий
2198.4	20.1	1, 6, 13, 16
2198.1	20.2	1, 7, 13, 16
2198.3	20.5	2, 6, 13, 16
2198.0	20.6	2, 7, 13, 16
2198.0	21.1	3, 7, 13, 16

Таблица 3. Ошибка (σ (K)) определения максимальной температуры 1500 K для пяти комбинаций линий, номера линий из табл. 1

T_{cal}	σ (K)	Комбинация линий
1499.4	6.3	1, 6, 12, 16
1499.4	6.4	1, 7, 13, 16
1499.3	6.4	2, 6, 12, 16
1499.4	6.5	2, 6, 13, 16
1499.3	6.5	1, 7, 12, 16

Таблица 4. Ошибка (σ (K)) определения максимальной температуры 2200 K для пяти комбинаций линий, номера линий из табл. 1

T_{cal}	σ (K)	Комбинация линий
2200.6	9.0	2, 10, 16
2200.6	9.0	3, 10, 16
2200.5	9.1	1, 10, 16
2200.6	9.4	5, 10, 16
2200.5	9.4	4, 10, 16

Таблица 5. Ошибка (σ (K)) определения максимальной температуры 1500 K для пяти комбинаций линий, номера линий из табл. 1

T_{cal}	σ (K)	Комбинация линий
1500.3	2.4	1, 10, 6
1500.3	2.4	2, 10, 16
1500.3	2.4	3, 10, 16
1500.3	2.5	4, 10, 16
500.2	2.5	2, 8, 16

Выше была описана процедура определения интегральных поглощений линий. Однако в реальном эксперименте интегральные поглощения определяются из зарегистрированных спектров. В описываемом численном эксперименте для используемой модели объекта спектры поглощения в окрестности выбранных сильных линий

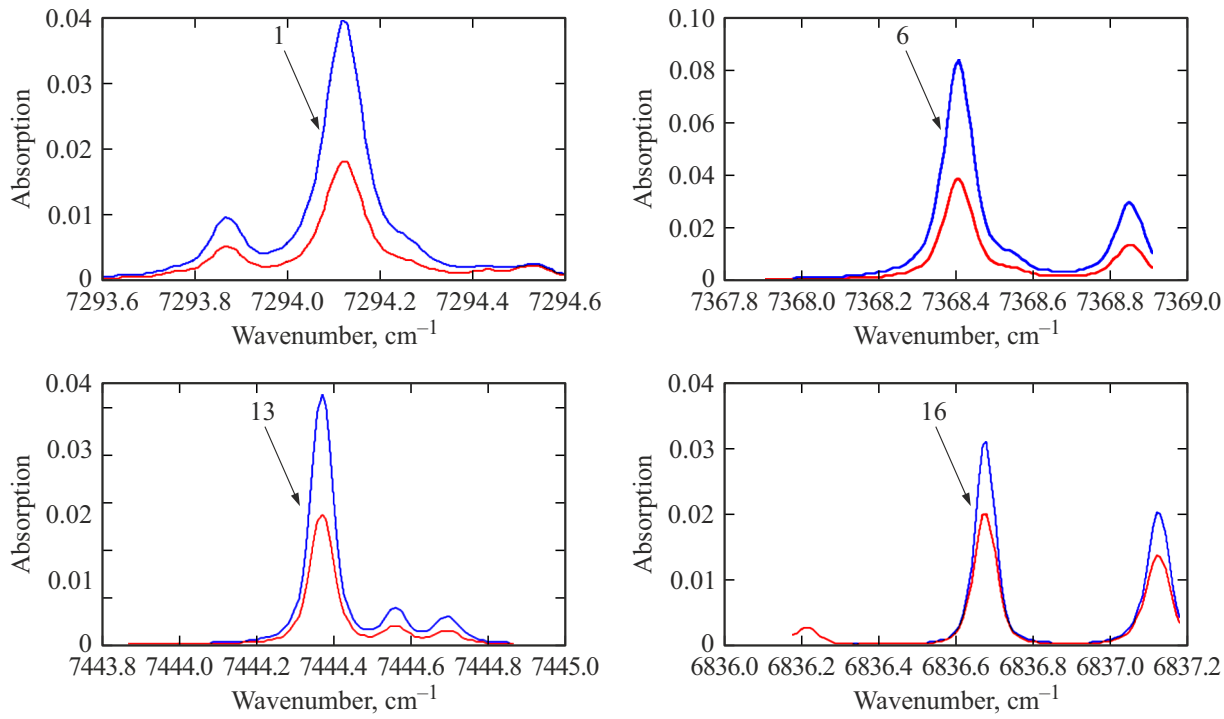

Рис. 1. Спектры поглощения на линиях 1, 6, 13, 16. Линии отмечены стрелками. Сплошная линия — высокая температура 1500 K, штриховая — 2200 K.

рассчитывались по формуле

$$\alpha(\nu) = \sum_j S_j(T_1) g_j(\nu - \nu_j) P_{H_2O} L_1 + \sum_j \int_0^{L_2} S_j(T(x)) g_j(\nu - \nu_j) P_{H_2O} dx, \quad (2)$$

где индекс j соответствует линии из HITRAN2020 в заданном спектральном интервале, $g_j(\nu)$ —- контур j-й линии. При расчете спектров поглощения по формуле (2) интегрирование заменяется суммированием с шагом 1 K.

Примеры рассчитанных таким способом участков спектра с линиями 1, 6, 13, 16 приведены на рис. 1. Эти спектры рассчитаны для отмеченных выше параметров среды и заданных максимальных температур 2200 или 1500 K при концентрации паров воды 0.05 atm (5%).

В описываемом численном эксперименте симулированные спектры будут рассматриваться в качестве „экспериментальных“. На первом этапе из этих спектров необходимо определить интегральное поглощение выбранных линий.

Обычно это достигается подгонкой симулированных спектров к экспериментальным спектрам методом нелинейных наименьших квадратов, причем профили линий подгоняются контуром Фойгта. Контур Фойгта хорошо соответствует форме линий при однородных распределениях температуры и концентрации. Однако в нашем случае температура неоднородна. В этом случае в литературе используется гибридный метод подгонки линии: сначала Фойгтом подгоняются крылья линии (центральная часть линии в подгонке не участвует) [15,16]. Затем численным интегрированием находится доля интегрального поглощения в центральной части линии, определяемая разностью между экспериментальным контуром линии и симулированным контуром Фойгта. Тогда суммарное интегральное поглощение линий будет определяться суммой найденной разности и интегрального поглощения симулированного контура Фойгта. Этот гибридный метод требует численного расчета разности, что может давать ошибку в определении интегрального поглощения линии в условиях больших шумов в реальном эксперименте.

Нами предлагается применять для определения интегрального поглощения подгонку с помощью двух контуров Фойгта. Интегральное поглощение линии является суммой двух интегральных поглощений этих контуров. Зная интегральные поглощения линий, для каждой комбинации из четырех линий решается обратная задача по расчету параметров модели. Приведем реальные результаты таких расчетов для этих двух подходов на примере рассматриваемой модели объекта, взяв для примера линии 1, 6, 13, 16, без учета шумов и влияния соседних слабых линий. Результаты расчетов приведены в табл. 6.

Результаты получаются близкие. Предложенный нами алгоритм расчета интегральной интенсивности с двумя контурами Фойгта технически более простой, так как

Таблица 6. Результаты расчета с использованием двух методов аппроксимации контура линии

Вариант	$T_{\min}$	$T_{\max}$	Длина участка спада температуры, cm	Давление паров воды, atm
2 Фойгта	498.77	1503.74	2	0.0502
2 Фойгта	499.01	2201.78	1.98	0.0503
Гибридный	489.06	1494.3	1.87	0.05
Гибридный	492.34	2193.96	1.92	0.05

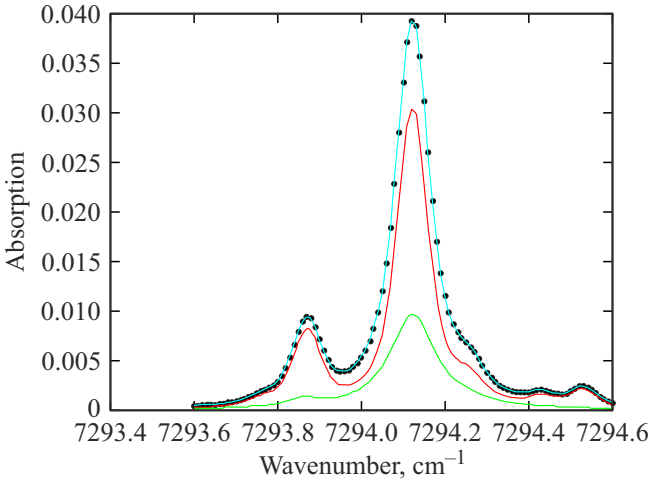

Рис. 2. Спектр поглощения в окрестности 7294 cm^{-1}. Сплошная линия — спектр поглощения в диапазоне 7294 cm^{-1}, черные точки — спектр подгонки (накладывается на сплошную линию), звезды — вклад низкотемпературного контура Фойгта, штриховая линия — вклад высокотемпературного контура Фойгта.

не требует численного расчета разности, который используется в гибридном методе [15,16]. Отметим, что решение обратной задачи восстановления параметров модели приводит в обоих методах к ошибкам даже в предположении отсутствия шумов и влияния соседних слабых линий. Это объясняется неточностью восстановления контуров линий (реальных экспериментальных или „модельных“) как гибридным методом, так и методом двух контуров Фойгта.

В реальных спектрах в окрестности сильных линий всегда имеются рядом расположенные более слабые линии, крылья которых тем не менее дают вклад в интегральный контур сильной линии. При подгонке реально зарегистрированных спектров необходимо учитывать влияние таких слабых соседних линий. Это увеличивает число подгоночных параметров (за счет интегральных интенсивностей слабых линий) и приводит к неустойчивости процедуры подгонки. Для повышения устойчивости алгоритма предлагается интенсивности слабых линий параметрически связать с интенсивностью сильных соседних линий в конкретном спектральном интервале. Для этого при подгонке фойгтовских контуров в качестве служебных подгоночных параметров используются

Таблица 7. Результаты расчета параметров модели для линий 1, 6, 13, 16 с подгонкой линий двумя Фойгтами для двух максимальных температур

$T_{\min}$	$T_{\max}$	Участок спада температуры, cm	Давление паров воды,atm
491.94	1495.5	1.93	0.0499
487.86	2180.31	1.91	0.0495

температура и концентрация тестовой молекулы. Для каждого спектрального интервала выбираются индивидуальные подгоночные параметры. При этом интенсивности слабых линий становятся не независимыми, а согласованы с интенсивностями сильных линий рассматриваемого спектрального диапазона. Пример подгонки участка спектра в диапазоне 7294 cm^{-1} (линия 1 в табл. 1) двумя контурами Фойгта приведен на рис. 2.

Отметим, что участок спектра, синтезированный с помощью формулы (2), хорошо подгоняется предложенным методом двух контуров Фойгта.

Проверку разработанного алгоритма проводили в несколько этапов. Вначале выбирали начальные параметры модели ($T^0_{\max} = 1500$ K или 2200 K, $T^0_{\min} = 500$ K, $L^0_2 = 2$ cm, $P_{H_2O} = 0.05$ atm) и с использованием данных HITRAN 2020 симулировали четыре участка спектров в окрестности линий 1, 6, 13, 16, которые будут считаться в дальнейших расчетах „экспериментальными“. С использованием предложенного метода подгонки с помощью двух контуров Фойгта определяли „экспериментальные“ интегральные интенсивности выбранных сильных линий. На следующем этапе решали обратную задачу нахождения параметров модели. Для этого методом нелинейных наименьших квадратов находили набор параметров, обеспечивающий наилучшую подгонку интегральных интенсивностей четырех линий, определенных с использованием формулы (2), к „экспериментальным“ значениям. Результаты такой проверки приведены в табл. 7.

Для упрощения конструкции ДЛАС-сенсора за счет уменьшения количества лазеров, требуемых для корректной оценки максимальной температуры, был проведен поиск пар линий молекулы воды, которые могут попадать в диапазон быстрой токовой перестройки одного DFB-лазера (~ 3 cm^{-1}). Отбор линий происхо-

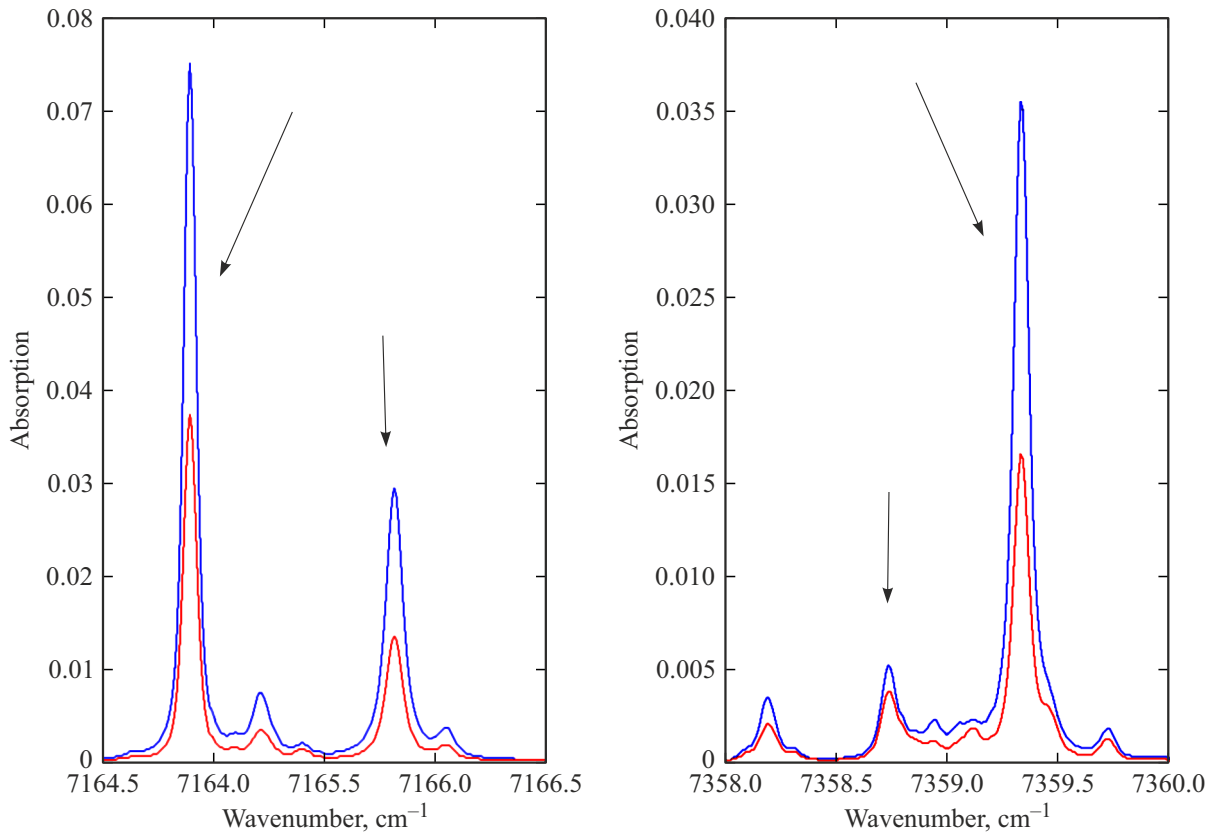

Рис. 3. Сплошной график — высокая температура 1500 K, штриховой график — высокая температура 2200 K, сильные линии отмечены стрелками.

дит по нескольким критериям. Первое: интенсивность линий с близкими нижними уровнями должна быть не меньше 10% от интенсивности максимальной линии. Второе: расстояние между линиями должно быть больше 0.3 cm^{-1}, но меньше 1 cm^{-1}. Третье: разность энергий нижних уровней должна превышать 400 cm^{-1}. Четвертое: интенсивность слабых линий не превышает 0.02 от интенсивности максимальной линии в диапазоне. При использовании этих критериев найден только один вариант пар линий, который позволяет использовать два ДЛ для регистрации поглощения на четырех линиях:
1) ДЛ1 — линии 7164.901 cm^{-1} (E 1394.81 cm^{-1}) и 7165.821 cm^{-1} (E 212.16 cm^{-1}),
2) ДЛ2 — линии 7358.741 cm^{-1} (E 2919.63 cm^{-1}) и 7359.33 cm^{-1} (E 1394.814 cm^{-1}).

На рис. 3 приведены спектральные интервалы, в которых расположены линии (отмечены стрелками), используемые для определения высокой температуры.

Сразу отметим, что ограничение выбора линий в пределах узкого спектрального диапазона приводит к ухудшению результатов. При нахождении высокой температуры с помощью этих пар линий ошибка вырастает почти в 4 раза по сравнению с рассмотренным выше случаем с четырьмя лазерами, работающими в разных спектральных диапазонах. Увеличение ошибки определяется тем обстоятельством, что пары линий, расположенные в диапазоне перестройки одного ДЛ (~ 3 cm^{-1}), как правило, более слабые.

Заключение

Исследованы особенности диагностики параметров пространственно неоднородных газовых сред в варианте зондирования объекта одним лазерным лучом (line-of-sight). В такой геометрии спектральный контур линии поглощения является результирующим по всей трассе лазерного луча, и задача определения интегрального поглощения является математически некорректной. Для наилучшего восстановления пространственного профиля температуры необходимо измерение поглощения на 16 спектральных линиях. Задача упрощается для важного случая определения максимальной температуры в предположении трапециевидной зависимости параметров среды от максимума к границе. В этом случае достаточно использовать 4 линии поглощения. Создана программа выбора оптимального набора линий поглощения тестовой молекулы H_2O в спектральном диапазоне 1.3–1.4 μm. Найдены различные комбинации линий поглощения тестовой молекулы H_2O, обеспечивающие определение максимальной температуры. Предложен модифицированный вариант подгонки интегральных линий поглощения в пространственно неоднородной среде

двумя контурами Фойгта. Проведена оценка точности определения максимальной температуры для различных наборов линий для конкретной экспериментальной ситуации (оптическая длина 12 cm, из которых 10 cm — участок с постоянной максимальной температурой и 2 cm — линейный спад до минимальной температуры окошек в тестовой камере). Оценка ошибок определения температуры проводилась для максимальных температур 2200 и 1500 K при минимальной температуре 500 K. Ошибки определения этих максимальных температур Δ составляют примерно 20 K для 2200 K и 10 K для 1500 K.

Проведена оценка варианта эксперимента, при котором температура холодной границы тестируемого газового объекта (окошки) не является неизвестным варьируемым параметром, а измеряется термопарой. Для этого случая возможно использование только трех диодных лазеров, работающих в разных спектральных диапазонах. Точность определения максимальной температуры в этом случае улучшается примерно в 2–3 раза.

Для случая, когда используются только два ДЛ, в диапазон перестройки которых попадают несколько линий, возможно использовать разработанный алгоритм восстановления максимальной температуры пространственно неоднородной газовой среды. Однако для такого случая ошибка определения температуры существенно возрастает, что объясняется неоптимальным набором линий поглощения, расположенных в ограниченном интервале перестройки ДЛ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] M.G. Allen. Meas. Sci. Technol., **9**, 545 (1998). DOI: 10.1088/0957-0233/9/4/001

[2] M.A. Bolshov, Yu. A. Kuritsyn, Yu.V. Romanovskii. Spectrochim. Acta Part B: At. Spectrosc., **106**, 45 (2015). DOI: 10.1016/j.sab.2015.01.010

[3] C.S. Goldenstein, R.M. Spearrin, J. B. Jeffries, R. K. Hanson. Prog. Energy Combust. Sci., **60**, 132 (2017). DOI: 10.1016/j.pecs.2016.12.002

[4] C. Liu, L. Xu. Appl. Spectrosc. Rev., **54**, (1), 1 (2018). DOI: 10.1080/05704928.2018.1448854

[5] М.А. Большов, Ю.А. Курицын, В.В. Лигер, В.Р. Мироненко, О.М. Колесников. Опт. и спектр., **122** (5), 726 (2017). DOI: 10.7868/s003040341705004x [M.A. Bolshov, Yu.A. Kuritsyn, V.V. Liger, V.R. Mironenko, O.M. Kolesnikov, Opt. Spectrosc., **122** (5), 705 (2017). DOI: 10.1134/S0030400X17050046].

[6] D.T. Cassidy, J. Reid. Appl. Opt., **21** (7), 1185 (1982). DOI: 10.1364/ao.21.001185

[7] C.L. Philippe, R.K. Hanson. Appl. Opt., **32**, 6090 (1993). DOI: 10.1364/ao.32.006090

[8] H. Li, G.B. Rieker, X. Liu, J. B. Jeffries, R.K. Hanson. Appl. Opt., **45** (5), 1052 (2006). DOI: 10.1364/ao.45.001052

[9] В.В. Лигер, В.Р. Мироненко, Ю.А. Курицын, М.А. Большов. Опт. и спектр., **127** (1), 55 (2019). DOI: 10.21883/OS.2019.07.47931.86-19 [V.V. Liger, V.R. Mironenko, Yu.A. Kuritsyn, M.A. Bolshov. Opt. Spectrosc., **127** (1), 55 (2019). DOI: 10.1134/S0030400X19070166].

[10] В.В. Лигер, В.Р. Мироненко, Ю.А. Курицын, М.А. Большов. Квант. электрон., **52**, (9), 831 (2022) [V.V. Liger, V.R. Mironenko, Yu.A. Kuritsyn, M.A. Bolshov. Bull. Lebedev Physics Institute, **50** (1), S66 (2023). DOI: 10.3103/S1068335623130067].

[11] V. Liger, V. Mironenko, Yu. Kuritsyn, M. Bolshov. Sensors, **23**, 622 (2023). DOI: 10.3390/s23020622

[12] A. Farooq, J.B. Jeffries, R.K. Hanson. Appl. Phys. B, **90** (3-4), 619 (2008). DOI: 10.1007/s00340-007-2925-y

[13] Y. Deguchi, T. Kamimoto, Y. Kiyota. Flow Meas. Instrum., **46**, 312 (2015). DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2015.06.025

[14] W. Cai, C.F. Kaminski. Prog. Energy Combust. Sci., **59**, 1 (2017). DOI: 10.1016/j.pecs.2016.11.002

[15] S.T. Sanders, J. Wang, J.B. Jeffries, R.K. Hanson. Appl. Opt., **40**, 4404 (2001). DOI: 10.1364/AO.40.004404

[16] X. Liu, J.B. Jeffries, R.K. Hanson. AIAA J., **45**, 411 (2007). DOI: 10.2514/1.26708

[17] N.A. Malarich, G.B. Rieker. JQSRT, Part I, **260**, 107455 (2021). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2020.107455

[18] N.A. Malarich, G.B. Rieker. JQSRT, Part II, **272**, 107805 (2021). DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107805

[19] X. Ouyang, P. Varghese. Appl. Opt., **28**, 18, 3979 (1989). DOI: 10.1364/AO.28.003979