

КВАНТОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 539.194

*О.К. ВОЙЦЕХОВСКАЯ, Д.Е. КАШИРСКИЙ, О.В. ЕГОРОВ***СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ СЕРНИСТОГО ГАЗА В СТРУЕ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ¹**

Исследована возможность регистрации SO_2 в факеле реактивного двигателя как один из методов контроля качества его работы. Расчеты спектральных характеристик выполнены по методике полинейного счета с использованием разработанного авторами информационно-вычислительного комплекса TRAVA и подготовленной спектроскопической базы данных по высокотемпературному SO_2 . В отличие от базы данных HITRAN, оригинальная спектроскопическая информация обладает предсказательной способностью вплоть до $T = 1500$ К. В результате установлено, что в случае активного детектирования SO_2 с помощью CO-лазера линия генерации, соответствующая переходу 32-31 P5, является перспективной для интервала температур $T = 300\text{--}1100$ К. Помимо этого, в данной работе теоретически установлен наиболее пригодный участок спектра для пассивного зондирования горячего SO_2 – $1330,0\text{--}1331,6$ см^{-1} , в котором уровень полезного сигнала превосходит фоновое излучение при минимальной концентрации SO_2 (5 ppm) в факеле двигателя.

Ключевые слова: сернистый газ, дистанционное зондирование, CO-лазер, реактивный двигатель, излучение, поглощение.

Введение

Различные типы двигателей, функционирующие за счет преобразования энергии топлива в тепловую посредством окислительных реакций, имеют специфическую характеристику излучения выхлопных газов, которая зависит от их типа, режима работы, вида применяемых топлив и называется сигнатурой. Регистрация спектральных характеристик выхлопных газов позволяет, на основе известных спектроскопических данных, идентифицировать сигнатуру двигателя, что открывает возможность диагностики качества его работы. Дистанционный анализ характера работы двигателей по эмиссионным или абсорбционным спектрам их выхлопов требует построения физических и математических моделей описания спектров газовых компонентов в широком диапазоне температур и концентраций, учета влияния атмосферы Земли на излучение газовой смеси выхлопа и развития методов решения обратных задач газоанализа [1–4]. Кроме этого, при выборе наиболее эффективного алгоритма диагностики излучающего объекта (высокотемпературного газового объема) необходим комплексный учет характеристик триады – «источник – среда – приемник» [5–7]. Это означает, что существуют теоретически обоснованные пределы в задаче дистанционной диагностики излучающего объекта и требуется разработка общей схемы, приводящей к аргументированному численному ответу о возможных характеристиках каждой составляющей рассматриваемого газового облака.

Сгорание топлива в авиационном двигателе приводит к образованию таких веществ, как оксиды азота, углерода и серы. Эти соединения участвуют в разнообразных химических реакциях с природными газовыми составляющими атмосферы Земли, что вызывает, в частности, появление сульфатов, влияющих на состояние стратосферы и тропосферы. Кроме этого, не менее важным представляется развитие методов контроля излучения выхлопной струи с целью предотвращения неадекватной работы двигателя, поскольку сигнатура отражает его характер функционирования. Измерение стандартного содержания газов в струе двигателя позволяет, например, оценить качество топлива, так как в среднем сжигание авиационного керосина приводит к выбросу 1 г серы на 1 кг топлива [8]. В литературе этой теме уделяется определенное внимание, причем ряд работ посвящен подробному анализу химических реакций в выхлопах авиадвигателей [4, 7, 9–11]. Отмечено, что струя на выходе из сопла содержит в основном сернистый газ (SO_2) [4] и только при его взаимодействии с атомарным кислородом воздуха образуется SO_3 , что позволяет пренебречь по-

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

следним соединением при анализе работы авиадвигателя. В [9] подчеркивается, что концентрация SO_2 в следе двигателя определяется только количеством серы в топливе.

Авторами работ [12, 13] исследовались возможности применения лазеров в качестве источников, по поглощению излучения которых можно определить газовый состав и концентрации соединений в выхлопной струе. В [12] промоделирована ситуация лазерного зондирования следа самолета Боинг 707 на высоте 12,2 км, причем ширина газового выброса принималась равной 1 м, а расстояние до него составляло 100 м. Отмечено, что поглощение природными компонентами атмосферы (углекислым газом и водяным паром) значительно затрудняет детектирование газового состава выброса. Предложены два варианта повышения чувствительности регистрации исследуемых компонентов за счет выбора оптимальных спектральных диапазонов: или выбор линий лазеров с низким поглощением фоновыми CO_2 и H_2O , или предпочтение линий лазеров с максимальным коэффициентом поглощения детектируемых газов. Недостатки работы [12] связаны как с использованием данных по параметрам спектральных линий выхлопных газов только при нормальной ($T \approx 300$ К) температуре, так и с отсутствием учёта влияния ширины лазерных линий на значения регистрируемых характеристик.

В работе [13] рассмотрены спектроскопические методы детектирования веществ в выхлопе авиационного двигателя, при этом наибольшее внимание уделено SO_2 . Рассчитаны ИК-спектры поглощения SO_2 и других газов для условий на срезе сопла двигателя самолета. Определены узкие спектральные интервалы, пригодные для обнаружения SO_2 в горячей струе. Проанализированы возможности CO_2 -лазеров (включая лазеры на изотопах CO_2) и CO -лазеров (действующих на фундаментальных колебательных переходах и на переходах первого колебательного обертона) применительно к обнаружению SO_2 в выхлопах авиационного двигателя. Отмечено, что применение CO -лазера, излучающего на фундаментальной колебательной полосе ($2400\text{--}2700$ cm^{-1}), дает большую чувствительность детектирования излучения сернистого газа. Помимо этого, предложены спектральные интервалы, наиболее удобные для регистрации SO_2 -методом дифференциального поглощения в области $1330\text{--}1390$ cm^{-1} . Причем проведенные в данной работе расчеты спектральных характеристик в указанных в [13] интервалах на основе параметров спектральных линий (ПСЛ) известной базы данных (БД) HITRAN 1996 [14] и нашей БД существенно отличаются.

Основная цель данной публикации – выбор оптимального спектрального диапазона в средней ИК-области спектра для оценки содержания SO_2 в выхлопе авиадвигателя дистанционным способом. При этом выполнено формирование БД ПСЛ SO_2 для высоких температур ($T \leq 1500$ К) в рассматриваемом диапазоне на основе разработанных алгоритмов расчета и проведен количественный анализ переноса излучения SO_2 в атмосфере Земли.

Моделирование спектральных характеристик выхлопных газов

Для строгого расчета ослабления излучения применяются разнообразные методики, но наиболее точной считается методика полинейного (line-by-line) счета, особенностью которой является учет вклада каждой спектральной линии в значения рассчитываемых характеристик. Формулы для этой методики многократно опубликованы [2, 15, 16] и требуют знания данных по параметрам спектральных линий газов, входящих в состав выхлопной струи.

Данная работа ориентирована на задачу наземного контроля функционирования двигателя за счет регистрации концентрации SO_2 в его выхлопе с помощью лазеров ИК-диапазона. Ранее в литературе параметры спектральных линий сернистого газа исследовались, за небольшим исключением [17], только при нормальной температуре. Температура же выхлопа авиационного или ракетного двигателя может изменяться в пределах $400\text{--}1500$ К [1, 18].

Преимущество данной работы в том, что все расчеты спектральных характеристик выполнены по методике полинейного счета с использованием подготовленной авторами БД ПСЛ высокотемпературного SO_2 ($T = 1000$ К). Известные из литературы БД содержат аналогичные данные по ПСЛ, пригодные только для нормальных условий ($T = 296$ К, $P = 1$ атм). В 2010 г. открыт свободный доступ к БД HITEMP 2010 [19], в которой содержатся параметры спектральных линий пяти газов (CO , CO_2 , H_2O , NO , OH), образованных переходами между колебательно-вращательными состояниями, включая весьма высокоэнергетические при температуре 1000 К. В этой базе данные о серосодержащих соединениях отсутствуют.

В настоящее время нами разработана универсальная информационно-вычислительная система TRAVA, обеспечивающая расчеты разнообразных спектральных характеристик как для широ-

кополосного, так и для квазимонохроматического излучения в широком спектральном и температурном (300–2500 К) диапазонах с учетом формы контура лазерной линии и аппаратной функции регистрирующего устройства [20, 21].

Методика расчета параметров спектральных линий сернистого газа при повышенных температурах

Использование теории возмущений позволяет выделить из общего колебательно-вращательного (КВ) гамильтониана молекулы эффективный колебательный гамильтониан и решать колебательную задачу отдельно от КВ-задачи. В этом случае интегральные интенсивности полос SO_2 могут быть рассчитаны по следующей формуле [22]:

$$S_\nu = \frac{8\pi^3}{3hcZ_\nu(T)} \nu_0 \left| \langle \nu_1 \nu_2 \nu_3 | \tilde{\mu}_z | \nu'_1 \nu'_2 \nu'_3 \rangle \right|^2 \exp[-hcE_\nu / kT] \cdot (1 - \exp[-h\nu_0 / kT]), \quad (1)$$

где π , h , c – мировые постоянные; $Z_\nu(T)$ – колебательная статистическая сумма; ν_0 – центр полосы; $\left| \langle \nu_1 \nu_2 \nu_3 | \tilde{\mu}_z | \nu'_1 \nu'_2 \nu'_3 \rangle \right|^2$ – квадрат матричного элемента дважды преобразованного дипольного момента в базисе колебательных волновых функций [22]; E_ν – энергия нижнего колебательного состояния.

При вычислении интегральных интенсивностей фундаментальных полос молекулы SO_2 по формуле (1) использовались значения параметров потенциальной функции из работы [23], а значения первых производных функции дипольного момента по нормальным координатам полагались равными: $\partial\mu/\partial q_1 = 0,12\text{D}$, $\partial\mu/\partial q_2 = 0,213\text{D}$, $\partial\mu/\partial q_3 = 0,315\text{D}$ [24]. При этом, в силу отсутствия резонансной связи между энергиями колебательных состояний молекулы SO_2 [25], для их восстановления достаточно было воспользоваться известной серийной формулой

$$E_\nu = \sum_k \omega_k (\nu_k + 1/2) + \sum_{k \geq l} \chi_{kl} (\nu_k + 1/2)(\nu_l + 1/2) + \dots, \quad (2)$$

где ω_k и χ_{kl} – гармонические и ангармонические постоянные.

Полученные в итоге центры колебательных полос и соответствующие им значения интегральных интенсивностей хорошо согласуются с известными экспериментальными данными (табл. 1).

Таблица 1

Результаты расчетов центров колебательных полос и значений их интегральных интенсивностей (S_ν) молекулы SO_2 при $T = 296\text{K}$

Полоса	Центр, cm^{-1}		Интегральная интенсивность, $\text{cm}^{-1}/(\text{cm}^{-2} \cdot \text{мол})$				
	Расчет	Эксперимент	Расчет	[28]	[29]	[30]	[31]
ν_2	517,87797	517,87261 [26]	$4,120 \cdot 10^{-18}$	–	–	$4,248 \cdot 10^{-18}$	–
ν_1	1151,7129	1151,71299 [27]	$3,452 \cdot 10^{-18}$	$3,514 \cdot 10^{-18}$	–	$3,593 \cdot 10^{-18}$	$3,411 \cdot 10^{-18}$
ν_3	1362,0589	1362,06069 [27]	$2,574 \cdot 10^{-17}$	$2,721 \cdot 10^{-17}$	$2,61 \cdot 10^{-17}$	$2,782 \cdot 10^{-17}$	$2,401 \cdot 10^{-17}$

Осуществлено моделирование коэффициента поглощения газа SO_2 в спектральных областях фундаментальных колебательных полос ν_1 и ν_3 , для интервала температур $T = 300\text{--}1200\text{K}$. Расчет интенсивностей КВ-линий производился по следующей формуле:

$$S = S_\nu \frac{\nu \cdot g_a \cdot L}{\nu_0 Z_r(T)} \exp[-hc(E - E_\nu) / kT] \times (1 - \exp[-h\nu / kT]) / (1 - \exp[-h\nu_0 / kT]), \quad (3)$$

где ν – центр КВ-линии; g_a – статистический вес; $Z_r(T)$ – вращательная статистическая сумма; E – энергия КВ-уровня, равная сумме энергий колебательного состояния и соответствующего вращательного уровня. При этом основой для нахождения интенсивностей послужили энергии КВ-уровней, определенные посредством численной диагонализации матрицы эффективного КВ-гамильтониана в симметризованном базисе вращательных волновых функций симметричного волчка со значениями параметров из следующих работ: (000), (010) [32]; (100), (001), (020) [33];

(110), (011), (030) [34]; (120), (200), (210) [35]; (002), (130) [25]; (103), (301) [36]; (101), (021), (111), (201) [37]; (003), (131) [38].

Полученные в результате расчета по формуле (3) интенсивности КВ-линий рассматриваемых состояний использовались далее для определения коэффициента поглощения. Аналогично БД НИТЕМР [19], температурный множитель T_0/T не учитывался, что соответствует приведению результатов к единицам STP (стандартной температуре 273,16 К и давлению 0,986 атм). Формула для коэффициента поглощения типа S/d следующая:

$$K(\nu) = \sum_i S_i / \Delta\nu, \quad (4)$$

где суммирование идет по линиям, попадающим в спектральный интервал $\Delta\nu$ равный 10 см^{-1} , причем учитывались линии, превышающие минимальную интенсивность $S_{\min} = 10^{-10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{атм}^{-1}$. Полученные в результате зависимости $K(\nu)$ для температур 300, 600, 900 и 1200 К представлены на рис. 1, *a* и *б* кривыми 1, 2, 3 и 4 соответственно. Пунктирная кривая на рис. 1, *a* – экспериментальные зависимости коэффициента поглощения SO_2 в спектральной области полосы ν_1 для $T = 300 \text{ К}$ (кривая 5) и $T = 600 \text{ К}$ (кривая 6), взятые из работы [39]; вертикальные линии на рис. 1, *б* – доверительные интервалы экспериментальных значений коэффициента поглощения SO_2 в районе полосы ν_3 при $T = 300 \text{ К}$ [40].

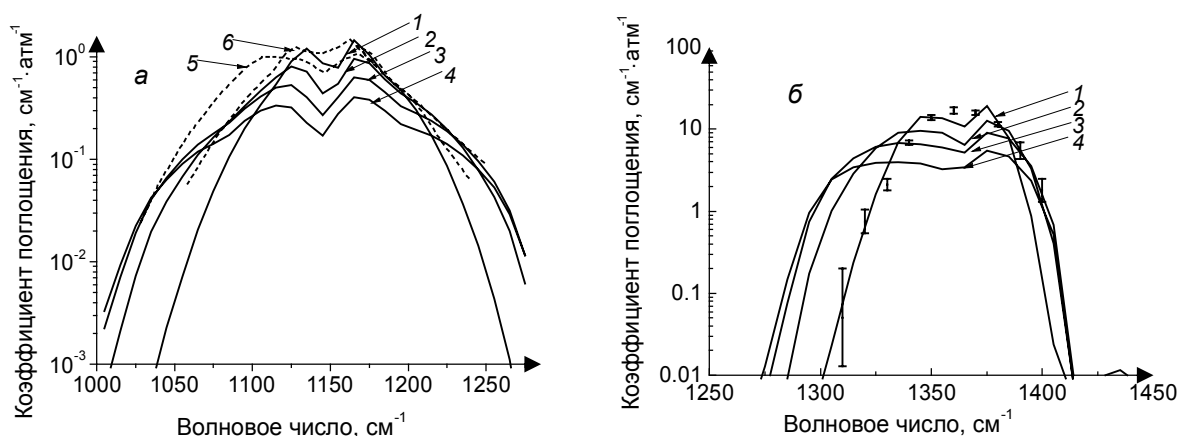


Рис. 1. Коэффициент поглощения SO_2 для секвенции полос с $\sum\Delta\nu_1 = 1$ (*a*) и $\sum\Delta\nu_3 = 1$ (*б*) при различных температурах

Согласно распределению Максвелла – Больцмана, повышение температуры приводит к возрастанию населенности верхних высоковозбужденных уровней энергии, что увеличивает вероятность поглощения молекул газа с данных уровней при их взаимодействии с электромагнитным излучением. Это обуславливает необходимость учета при расчете высокотемпературных спектральных характеристик переходов между группами состояний, входящих в одну секвенцию полос, для которых значения интенсивностей линий при нормальных температурах пренебрежимо мало. В случае высоких температур интенсивности «горячих» линий, расположенных в крыльях полосы, могут достигать величины интенсивности «холодных», локализованных в ее центре. На рис. 2, *a* показана спектральная зависимость коэффициента поглощения SO_2 в области полосы ν_3 в линейном масштабе для $T = 300 \text{ К}$ (кривая 1) и 1000 К (кривая 3), полученная на основе ПСЛ, взятых из БД НИТРАН 2008 [41]. Кривая 2 – расчет с использованием БД авторов данной работы для $T = 1000 \text{ К}$ – превышает в 2–3 раза соответствующие значения кривой 3, что свидетельствует о весомом (40–50 %) вкладе линий, образованных «горячими» переходами. Из анализа результатов расчета интенсивности излучения SO_2 на основе БД НИТРАН, представленных на рис. 2, *б* (кривые 3 и 4), следует, что увеличение температуры газа до $T = 1500 \text{ К}$ (кривая 3) не приводит к возрастанию излучения в сравнении со значениями при $T = 300 \text{ К}$ (кривая 4). С другой стороны, излучение в крыле секвенции полос возрастает с ростом температуры газа, при использовании нашей БД (кривая 1 – $T = 1500 \text{ К}$, кривая 2 – $T = 300 \text{ К}$), что является теоретически правильным.

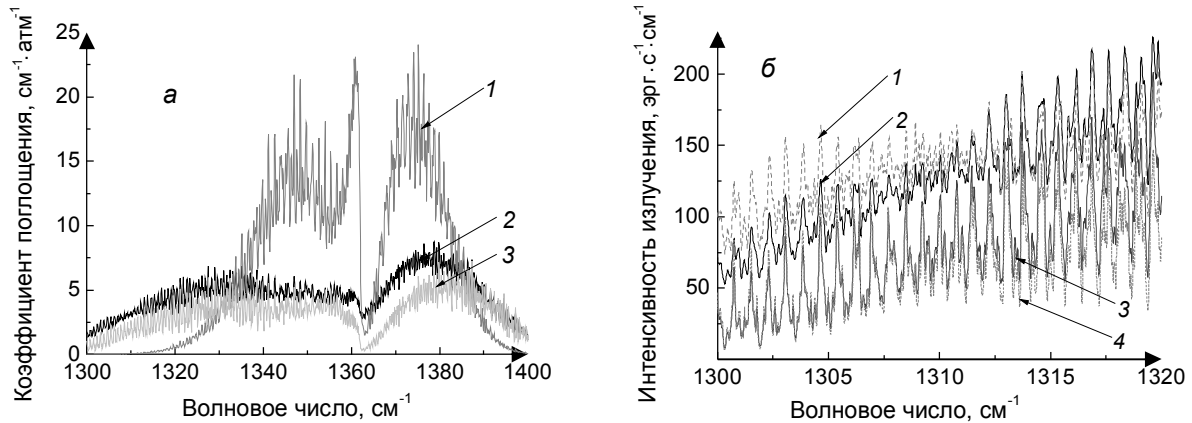


Рис. 2. Результаты расчета: *a* – коэффициента поглощения SO_2 в спектральной области полосы ν_3 ; *б* – интенсивности излучения в интервале $1300\text{--}1320\text{ см}^{-1}$, полученные на основе ПСЛ авторов данной работы и ПСЛ БД HITRAN [41]

Моделирование экспериментальных спектральных характеристик высокого разрешения SO_2

Сформированная БД ПСЛ SO_2 послужила источником входных данных при расчете спектральных характеристик SO_2 . Так как практическое направление изложенных в статье результатов – моделирование работы аппаратного стенда для дистанционной диагностики работы двигателя в наземных условиях, то основное внимание уделено исследованию полосы ν_3 ($7,4\text{ мкм}$). Это связано с тем, что данная полоса расположена на границе окна прозрачности атмосферы $8\text{--}12\text{ мкм}$ и в ее области наблюдается максимальное поглощение данным газом (рис. 2, *б*).

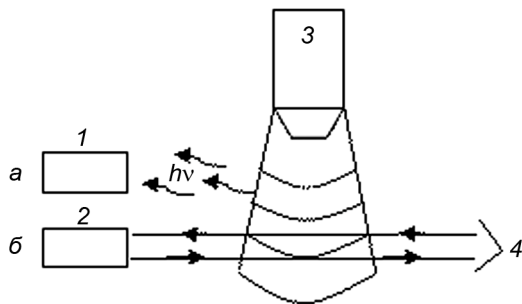


Рис. 3. Схемы пассивного (*a*) и активного (абсорбционного) (*б*) методов зондирования выхлопа реактивного двигателя: 1 – гетеродинный приемник; 2 – зондирующий комплекс (лидар); 3 – реактивный двигатель; 4 – отражатель

Проведены два варианта расчетов. В первом случае осуществлено моделирование лазерного зондирования выхлопа двигателя с целью определения кинетической температуры газовой-аэрозольной среды и концентрации SO_2 (рис. 3, *б*). Во втором варианте проанализирована возможность использования пассивного способа регистрации излучения SO_2 и оценена интенсивность собственного излучения этого газа, прошедшего через холодную атмосферу (рис. 3, *a*).

В работе [42] рассмотрены вопросы дистанционного детектирования SO_2 в камере сгорания. Излучение нагретого SO_2 измерялось гетеродинным приемником на основе перестраиваемого диодного лазера. Для сравнения с результатами работы [42]

было произведено моделирование регистрируемого приемником потока излучения по формуле

$$\Phi = \lambda^2 B \int_{\nu_0 - B/2}^{\nu_0 + B/2} \varepsilon(\nu) L_\nu^0(T) A(\nu - \nu_0) d\nu, \quad (5)$$

где B – полоса пропускания прибора; $\varepsilon(\nu) = 1 - e^{-k_\nu(P,T) \rho l}$ – излучательная способность в приближении локального термодинамического равновесия; $k_\nu(P,T)$ – коэффициент поглощения газа; ρ – парциальное давление газа; l – протяженность газового слоя; $L_\nu^0(T)$ – формула Планка; $A(\nu - \nu_0)$ – аппаратная функция приемника. Расчет излучения горячего SO_2 проведен для следующих аналогичных экспериментальным условиям: воздушный слой длиной $l = 2\text{ см}$ с давлением $P = 100\text{ Торр}$ ($0,13158\text{ атм}$), парциальное давление SO_2 $\rho = 5\text{ Торр}$ ($0,00658\text{ атм}$) при температуре $T = 900\text{ К}$, спектральный интервал $1335,7\text{--}1336,1\text{ см}^{-1}$, приемник с прямоугольной аппаратной функцией и разрешающей способностью $0,023\text{ см}^{-1}$ (полоса пропускания прибора 700 МГц [42]). При этом по-

лученная при указанных условиях зависимость (рис. 4, а, кривая 2) имеет больше совпадений с экспериментом (кружки) по сравнению с аналогичной из работы [42] на основе БД HITRAN [14].

На рис. 4, б приведена зависимость функции пропускания (ФП) SO_2 в районе $1335,7\text{--}1336,1\text{ см}^{-1}$, где кривая 1 – расчет авторов данной работы, кривая 2 – эксперимент [42]. Моделирование осуществлялось согласно экспериментальным условиям, заявленным в [42]: парциальное давление SO_2 , находящегося в кювете с длиной $l = 2\text{ см}$ при температуре $T = 900\text{ К}$, равнялось $0,5\text{ Торр}$ ($0,000658\text{ атм}$); параметры регистрирующего устройства аналогичны предыдущему эксперименту.

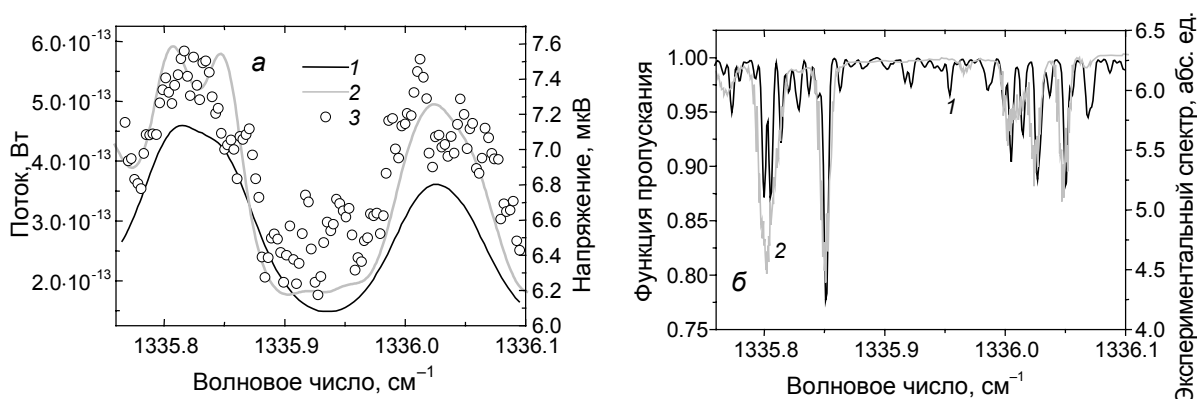


Рис. 4. Излучение нагретого ($T = 900\text{ К}$) SO_2 : кр. 1 – расчет [42], кр. 2 – расчет [данная работа], 3 – экспериментальные значения [42] (а). Функция пропускания SO_2 при $T = 900\text{ К}$: кр. 1 – расчет [данная работа], кр. 2 – эксперимент [42] (б)

Рассчитанный спектр пропускания в целом совпадает с экспериментальным [42]. Однако на расчетной кривой прописывается большее число линий и можно предположить, что их отсутствие на рис. 8 в [42] объясняется или чувствительностью регистрации излучения, или особым видом аппаратной функции (в нашем расчете использовалась прямоугольная аппаратная функция).

Результаты расчетов ФП SO_2 по данным [8] приведены на рис. 5 и иллюстрируют заметное поглощение этим газом (дополнительные линии обусловлены другими примесными газами). Согласно условиям [8, рис. 10], рассчитана спектральная зависимость ФП в интервале $1100\text{--}1240\text{ см}^{-1}$ с шагом $0,1\text{ см}^{-1}$ для слоя длиной 200 см с добавленным SO_2 в количестве $0,00025\text{ атм}$, при температуре 308 К ; приемник с прямоугольной формой аппаратной функции и разрешающей способностью $0,2\text{ см}^{-1}$. Из рис. 5 следует, что такое содержание SO_2 может быть уверенно зарегистрировано по изменению ФП.

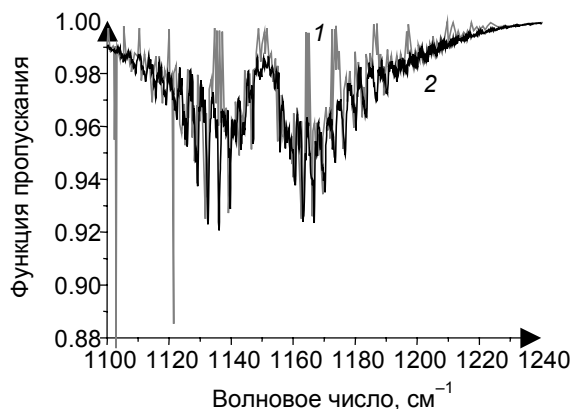


Рис. 5. Функция пропускания SO_2 в области полосы ν_1 ($8,7\text{ мкм}$) при $T = 308\text{ К}$: кр. 1 – эксперимент [8], кр. 2 – расчет [данная работа]

Поглощение излучения СО-лазера нагретым сернистым газом

При абсорбционном дистанционном зондировании газовых объемов, находящихся в атмосфере Земли, используются мощные источники когерентного оптического излучения, генерируемого в окнах прозрачности атмосферы. Поскольку SO_2 имеет сильную полосу поглощения в области $7,4\text{ мкм}$ (рис. 2, б), то применение СО-лазера, имеющего в данном диапазоне множество линий генерации, является наиболее перспективным для его регистрации. При вычислении характеристик взаимодействия лазерного излучения с газовыми средами следует подчеркнуть необходимость точного знания параметров линии излучения используемого лазера: формы контура, спектральной ширины и центра линии. Контур линии лазера определяется не только условиями генерации в активном элементе, но и характеристиками резонатора, и при высококогерентном излуче-

нии ширина линии лазера технически трудно определима. Предложен простой способ определения спектральной ширины лазерного излучения абсорбционным методом [43], но для такой тяжелой молекулы, как SO_2 , ширина лазерной линии в пределах $0,001\text{--}0,02\text{ см}^{-1}$ при атмосферных условиях дает близкие значения спектральных характеристик (расхождение в пределах сотых долей процентов). Однако для случая кюветных измерений, когда концентрация газа мала и имеет место доплеровское уширение, ширина и форма лазерной линии определяют значение ослабления излучения. Например, при давлении $0,001\text{ атм}$ SO_2 , длине пути 100 см и температуре 1000 К оптическая толщина при ширине линии лазера $0,001\text{ см}^{-1}$ равна $0,024$, при ширине $0,02\text{ см}^{-1}$ – $0,107$. Вопрос о точности центров линии излучения лазера также остается важным. В [5–12, 13] предложены длины волн СО-лазера, пригодные для зондирования содержания SO_2 в выхлопах двигателей. Известно, что для высоких колебательно-вращательных состояний молекулы СО существуют расхождения в знаках порядка сотых долей см^{-1} в центрах линий генерации. При расчетах это приводит к изменениям значений ФП, достаточным для внесения погрешности в извлекаемую из нее концентрацию. Поэтому в настоящей работе использовались экспериментальные данные по частотам генерации СО-лазера [44], несмотря на существующие теоретические, например [45], определенные до знака порядка 10^{-5} см^{-1} . При расчетах необходимые значения входных данных полагались равными: температура SO_2 $T = 500, 700, 900$ и 1100 К ; диаметр факела $d = 2\text{ м}$; длина оптического пути 4 м (учитывая отражатель); концентрация SO_2 , $\rho = 5 \cdot 10^{-5}\text{ атм}$; ширина лазерной линии $\Delta\nu = 0,002\text{ см}^{-1}$, приемник с прямоугольной формой аппаратной функции. Параметры атмосферы (США AFGL): модель средних широт, лето, приземный слой, трасса длиной 10 м .

Из результатов расчета, представленных в табл. 2, следует, что лазерная линия на переходе 32-31 P5 является наиболее универсальной для наземной абсорбционной диагностики факела реактивного двигателя с $d = 2\text{ м}$ по количеству SO_2 в нем, так как в этом случае наблюдается доминирующее поглощение SO_2 по сравнению с атмосферными газами в широком температурном интервале. Использование линий на переходах 32-31 P10 и 31-30 P9 ограничивается температурами факела, не превышающими 1100 и 500 К соответственно.

Таблица 2

Результаты расчета функций пропускания нагретого SO_2 для различных длин волн генерации зондирующего СО лазера

Линии генерации СО-лазера			Функция пропускания газа SO_2 при различных температурах, К				Функция пропускания атмосферы
Источник	Идентификация	Центр, см^{-1}	1100	900	700	500	
[44]	30-29 P10	1376,63	0,9695	0,9531	0,9254	0,8721	0,8673
	31-30 P9	1355,81	0,9809	0,9677	0,9441	0,9032	0,9430
	31-30 P11	1349,55	0,9759	0,9616	0,9383	0,8952	0,4310
	32-31 P5	1343,84	0,9790	0,9648	0,9338	0,8847	0,9734
	32-31 P6	1340,90	0,9804	0,9675	0,9446	0,9035	0,4732
	32-31 P10	1328,78	0,9802	0,9688	0,9529	0,9391	0,9884

Регистрация излучения нагретого сернистого газа гетеродинамическим фотоприемным устройством на основе СО-лазера

Далее представим результаты моделирования регистрации фотоприемным устройством излучения, исходящего от нагретого газа SO_2 , прошедшего через холодную атмосферу.

В проведенном численном эксперименте использовались параметры факела двигателя и характеристики атмосферы, аналогичные случаю активной диагностики. Так как нагревание атмосферы горячими струями факела приводит к изменению интенсивности излучения находящихся в ней газов, то это необходимо учитывать при выборе спектрального интервала для детектирования с высоким отношением сигнал/шум. В области полосы ν_3 SO_2 расположены сильные линии поглощения водяного пара, и его излучение является доминирующим по сравнению с остальными атмосферными газами. Согласно расчетным данным, приведенным на рис. 6, а, существует перспективный для пассивной диагностики участок спектра (рис. 6, б) – $1330,0\text{--}1331,6\text{ см}^{-1}$, в котором значения интенсивности излучения SO_2 превосходят соответствующие данные для H_2O (определенные для концентрации $\rho = 0,0188102\text{ атм}$) в условиях выбранного типа атмосферы.

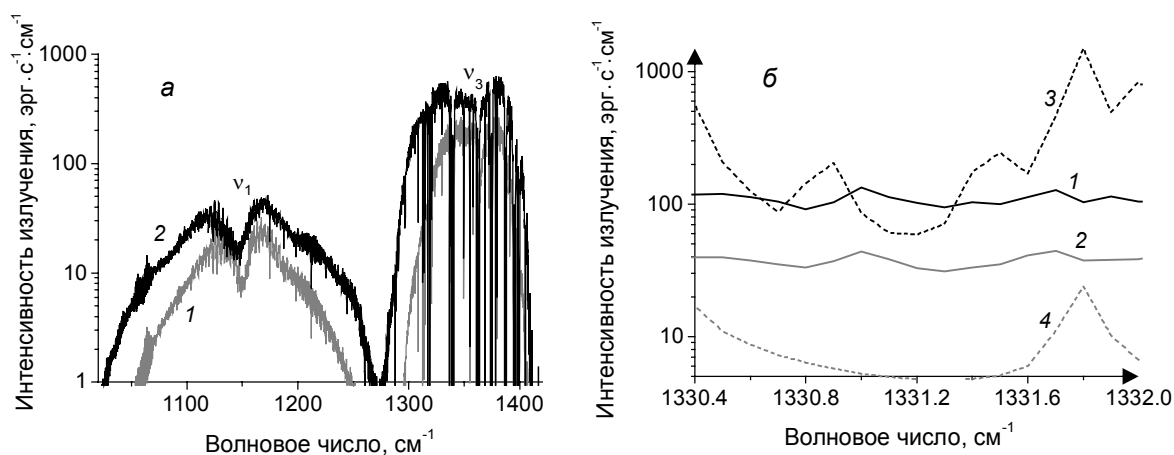


Рис. 6. Интенсивность излучения SO_2 с учетом функции пропускания атмосферы для трассы длиной 10 м при $T = 500$ (кр. 1) и 1000 К (кр. 2) (а). Спектральный интервал, перспективный для пассивного детектирования SO_2 : сплошные кривые – интенсивность излучения SO_2 : кр. 1 – $T = 500$ К, кр. 2 – $T = 1000$ К; пунктирные кривые – интенсивность излучения H_2O при $T = 500$ (кр. 3) и 1000 К (кр. 4) (б)

Заключение

В данной работе исследовалась возможность регистрации SO_2 в факеле реактивного двигателя как один из методов контроля качества его работы. По результатам проведенных численных экспериментов, ориентированных на наземную дистанционную диагностику, можно сделать следующие выводы. Разработанная база данных по высокотемпературным параметрам спектральных линий SO_2 обладает наилучшей предсказательной способностью вплоть до $T = 1500$ К, в отличие от низкотемпературной БД HITRAN (см. рис. 2, б). В случае активного детектирования SO_2 с помощью СО-лазера, линия генерации, соответствующая переходу 32-31 P5, является перспективной для интервала температур $T = 300$ –1100 К. Зондирование на линиях, генерируемых на переходах 32-31 P10 и 31-30 P9, ограничивается температурами факела, не превышающими 1100 и 500 К соответственно.

Пассивный метод определения концентрации газа по его собственному излучению, регистрируемому детектором, более привлекателен в силу его простоты. В данной работе теоретически установлен наиболее пригодный для применения этого метода участок спектра – $1330,0$ – $1331,6$ cm^{-1} , где уровень полезного сигнала превосходит фоновое излучение при минимальной концентрации SO_2 (5 ppm) в факеле двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лазарев Л. П. Оптико-электронные приборы наведения. – М.: Машиностроение, 1989. – 512 с.
2. Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Теоретические основы атмосферной оптики. – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.
3. Лазерный контроль атмосферы / под ред. Э. Д. Хинкли. – М.: Мир, 1979. – 416 с.
4. Brown R.C., Miake-Lye R.C., Anderson M.R., et al. // J. Geophys. Res. – 1996. – V. 101. – No. D17. – P. 22939–22953.
5. Menzies R.T. // Appl. Opt. – 1971. – V. 10. – No. 7. – P. 1532–1538.
6. Antcliffe G.A. and Wrobel J.S. // Appl. Opt. – 1972. – V. 11. – No. 7. – P. 1548–1552.
7. Miake-Lye R.C., Anderson B.E., Cofer W.R., et al. // Geophys. Res. Lett. – 1998. – V. 25. – No. 10. – P. 1677–1680.
8. Schmidt S.C. // Technical report LA-UR-99-2961, OSTI ID 785073. – 1999. – 31 p.
9. Miake-Lye R.C., Martinez-Sanchez M., Brown R.C., et al. // NASA CR 189688. – Aerodyne Research, INC., Billerica, MA. – 1992. – 109 p.
10. Brown R.C., Miake-Lye R.C., Kolb C.E., et al. // Geophys. Res. Lett. – 1996. – V. 23. – P. 3603–3606.
11. Brown R.C., Miake-Lye R.C., Anderson M.R., et al. // Geophys. Res. Lett. – 1996. – V. 23. – P. 3607–3610.
12. Ivanov S.V. // Phys. Wave Phenom. – 2007. – V. 15. – No. 1. – P. 57–65.
13. Buzykin O.G., Ivanov S.V., Ionin A.A., et al. // J. Russ. Laser Res. – 2005. – V. 26. – No. 5. – P. 402–426.

14. Rothman L.S., Rinsland C.P., Goldman A., et al. // JQRT. – 1998. – V. 60. – No. 5. – P. 665–710.
15. Гуди Р.М. Атмосферная радиация. – М.: Мир, 1966. – 524 с.
16. Мицель А.А., Фирсов К.М., Фомин Б.А. Перенос оптического излучения в молекулярной атмосфере. – Т.: STT, 2001. – 444 с.
17. Osumi M. and Kunitomo T. // JQSRT. – 1977. – V. 17. – P. 493–499.
18. Starik A.M., Savel'ev A.M., Titova N.S., and Schumann U. // Aerospace Sci. Technol. – 2002. – V. 6. – No. 1. – P. 63–81.
19. Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J., et al. // JQSRT. – 2010. – V. 111. – No. 15. – P. 2139–2150.
20. Войцеховская О.К., Войцеховский А.В., Каширский Д.Е. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9/3. – С. 157–158.
21. Войцеховский А.В., Войцеховская О.К., Каширский Д.Е. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 8/3. – С. 86–87.
22. Войцеховская О.К. // Оптика атмосферы. – 1990. – Т. 3. – № 6. – С. 585–591.
23. Suzuki I. // Appl. Spectrosc. Rev. – 1975. – V. 9. – No. 1. – P. 249–301.
24. Nakanaga T., Kondo S., and Saeki S. // J. Mol. Spectrosc. – 1980. – V. 82. – No. 2. – P. 413–423.
25. Lafferty W.J., Pine A.S., Flaud J.-M., and Camy-Peyret C. // J. Mol. Spectrosc. – 1993. – V. 157. – P. 499–511.
26. Coudert L., Maki A., and Olson W.B. // J. Mol. Spectrosc. – 1987. – V. 124. – P. 437–442.
27. Guelachvili G., Ulenikov O.N., and Ushakova G.A. // J. Mol. Spectrosc. – 1984. – V. 108. – P. 1–5.
28. Chu P.M., Wetzel S.J., Lafferty W.J., et al. // J. Mol. Spectrosc. – 1998. – V. 189. – P. 55–63.
29. Henningsen J., Barbe A., and Backer-Barilly M.-R. // JQSRT. – 2008. – V. 109. – P. 2491–2510.
30. Tasinato N. // Dottorato di ricerca. – Università Ca' Foscari Venezia, 2008. – 267 p.
31. Sumpf B. // J. Mol. Struct. – 2001. – V. 599. – P. 39–49.
32. Müller H.S.P. and Brünken S. // J. Mol. Spectrosc. – 2005. – V. 232. – No. 2. – P. 213–222.
33. Flaud J.-M., Perrin A., Salah L.M., et al. // J. Mol. Spectrosc. – 1993. – V. 160. – P. 272–278.
34. Ulenikov O.N., Gromova O.V., Bekhtereva E.S., et al. // JQSRT. – 2011. – V. 112. – No. 3. – P. 486–512.
35. Lafferty W.J., Flaud J.-M., and Guelachvili G. // J. Mol. Spectrosc. – 1998. – V. 188. – P. 106–107.
36. Ulenikov O.N., Bekhtereva E.S., Alanko S., et al. // J. Mol. Spectrosc. – 2009. – V. 257. – P. 137–156.
37. Lafferty W.J., Pine A.S., Hilpert G., et al. // J. Mol. Spectrosc. – 1996. – V. 176. – P. 280–286.
38. Flaud J.-M. and Lafferty W.J. // J. Mol. Spectrosc. – 1993. – V. 161. – P. 396–402.
39. Kunitomo T., Masuzaki H., Ueoka S., and Osumi M. // JQSRT. – 1981. – V. 25. – P. 345–349.
40. Chan S.H. and Tien C.L. // J. Heat Transfer. – 1971. – V. 93. – P. 172–178.
41. Rothman L.S., Gordon I.E., Barbe A., et al. // JQRT. – 2008. – V. 110. – No. 5. – P. 665–710.
42. Weidmann D. and Courtois D. // JQSRT. – 2004. – V. 83. – P. 655–666.
43. Voitsekhovskaya O.K., Volkov D.V., Kashirskii D.E., et al. // Quant. Electron. – 2012. – V. 42. – No. 7. – P. 634–639.
44. Yardley J.T. // J. Mol. Spectrosc. – 1970. – V. 35. – P. 314–324.
45. Velichko T.I., Mikhailenko S.N., and Tashkun S.A. // JQSRT. – 2012. – V. 113. – P. 1643–1655.

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

Поступила в редакцию 05.02.13.