

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ



Национальный исследовательский
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Т Р У Д Ы
ПЯТНАДЦАТОЙ
ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
СТУДЕНЧЕСКИХ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ
ИНКУБАТОРОВ

Томск, 17–19 мая 2018 г.



ТОМСК
«Издательство НТЛ»
2018

Оптическая диагностика высокотемпературных газовых сред¹

О.В. Егоров, Д.Е. Каширский

Томский государственный университет, г. Томск, Россия

В настоящее время возрастает актуальность разработки методов дистанционной (оптической) диагностики высокотемпературных газовых сред. Нагретые газы образуются при сжигании топлив, в результате извержений вулканов, присутствуют в звёздных и планетарных космических объектах. Для проведения дистанционной диагностики нагретых газов необходимо разрабатывать методики определения их температуры и концентраций на основе измеренных значений спектральных характеристик. Данная задача подразумевает также разработку физико-математических моделей, описывающих параметры спектральных линий нагретых газов, и методов моделирования спектральных характеристик высокотемпературных газовых сред.

Авторами ранее предложен метод определения температуры и концентраций газов посредством решения системы нелинейных алгебраических уравнений, состоящей из аппроксимационных полиномов, описывающих эталонные значения измеряемой спектральной характеристики [1]. Данный метод успешно применялся для интерпретации продуктов сжигания этилового спирта [2]. В [3, 4] обсуждается усовершенствованный вариант метода, когда число уравнений больше двух, что является минимально возможным для нахождения двух неизвестных. Увеличение числа уравнений позволяет уменьшить ошибку определения температуры и концентраций до минимально возможной величины – ошибки аппроксимации эталонных спектральных характеристик. Например, в случае газов CO_2 [3] и H_2O [4] ошибка определения температур и концентраций в интервалах 500–1770 К и 0,17–1 атм не превышала погрешность измерения применяемых спектров пропускания (5 %). Иными словами, точность метода зависит только от того, насколько измеряемые значения спектральной характеристики расходятся от рассчитанных по полиному. В данной работе рассматривается вариант ме-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00472 и стипендий Президента РФ (СП-2547.2016.1 и СП-3875.2018.5).

тогда аппроксимационных полиномов для температуры и концентраций сразу нескольких газов в составе смеси. Представленные ниже результаты получены для газовой смеси, состоящей из H_2O , CO_2 , CO и NO при следующих вариациях по температуре и концентрациям: 800–1800 К (с шагом 100 К) и 0,1–1 атм (с шагом 0,1 атм).

Основная часть

В качестве спектральных характеристик в данной работе рассматриваются спектры пропускания смеси из газов H_2O , CO_2 , CO и NO , для вычисления которых применялось программное обеспечение TRAVA [5] и база высокотемпературных параметров спектральных линий HITEMP2010 [6]. Спектральное разрешение полагалось равным 1 см^{-1} . По аналогии с однокомпонентной газовой средой, для аппроксимации температурных и концентрационных зависимостей спектров пропускания смеси (τ) из четырёх газов в каждом спектральном участке q использовались полиномы следующего вида:

$$\begin{aligned}\tau_q(T, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4) &= \sum_{i,j,l,m,k}^n a_{ijlmk} \rho_1^i \rho_2^j \rho_3^l \rho_4^m T^k, \\ \tau_q(T, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4) &= \sum_{i,j,l,m,k}^n a_{ijlmk} \rho_1^i \rho_2^j \rho_3^l \rho_4^m T^k,\end{aligned}\quad (1)$$

где n – максимальная степень.

В случае газовой смеси важным является вопрос выбора спектральных участков, на которых поглощение каждым из рассматриваемых газов доминирует над всеми остальными. Все выбранные газы имеют полосы поглощения в спектральном интервале $1000\text{--}2500\text{ см}^{-1}$, центры которых не совпадают. Однако с повышением температуры происходит увеличение поглощения в крыльях полос и сложно избежать перекрывания (рис. 1). Поэтому для каждого газа было выбрано пять центров для их однозначной идентификации в составе смеси при $T = 800\text{--}1800\text{ К}$ и $p = 0,1\text{--}1\text{ атм}$ (таблица).

Средняя ошибка аппроксимации спектров пропускания смеси выражением (1) составила 0,15 % (при $n = 4$) и 0,05 % (при $n = 5$), что по своему порядку соответствует случаям с однокомпонентными газовыми средами (например, 0,17 % в [3] и 0,19 % в [4] при $n = 4$). При этом каждый дополнительный газ увеличивает количество обрабатываемых значений спектральной характеристики примерно на порядок. Так, для рассматриваемого в данной работе случая в каждом спектральном уча-

стке q спектр пропускания принимал 110000 значений при различных комбинациях ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 и T . Для аппроксимации таких массивов данных применялись специально разработанные для этого программы.

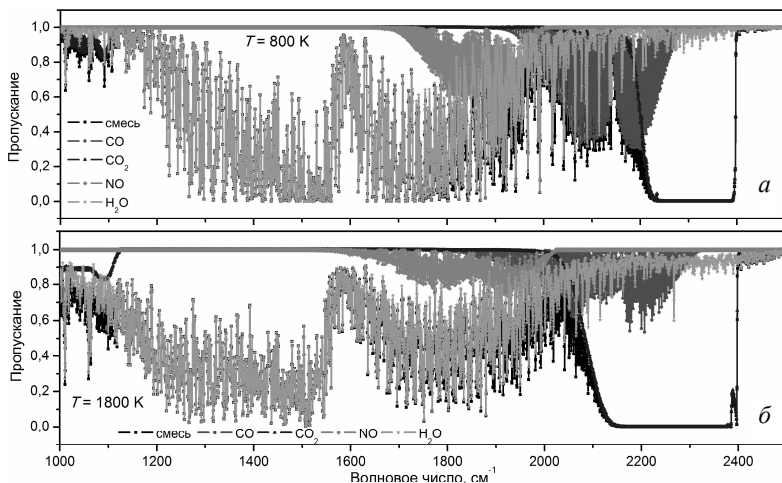


Рис. 1. Спектры пропускания газов H_2O , CO_2 , CO и NO по отдельности и в составе рассматриваемой смеси при $T = 800 \text{ K}$ (а) и $T = 1800 \text{ K}$ (б): $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 0,4314 \text{ атм}$, $\rho_{\text{CO}_2} = 0,4314 \text{ атм}$, $\rho_{\text{CO}} = 0,0686 \text{ атм}$ и $\rho_{\text{NO}} = 0,0686 \text{ атм}$

Спектральные центры (см^{-1}) газов H_2O , CO , CO_2 и NO

H_2O	CO	CO_2	NO
1135,8500	2003,9320	1023,5440	1852,5840
1152,2380	2008,7520	1048,6080	1899,8200
1173,4460	2020,8020	2069,9660	1925,8480
1185,9780	2025,1400	2084,4260	1940,3080
1198,0280	2032,8520	2397,7260	1960,0700

В настоящий момент в литературе нет измеренных спектральных характеристик для смеси из четырёх газов при высоких температурах, поэтому решение обратной задачи сводилось к восстановлению исходных ρ_1 , ρ_2 , ρ_3 , ρ_4 и T , при которых проводились расчёты спектров пропускания смеси. Как следует из рис. 2, средняя ошибка одновременного определения температуры и концентраций четырёх газов в составе смеси равна 0,09 % при $n = 5$ и соответствует по своему порядку ошибке аппроксимации.

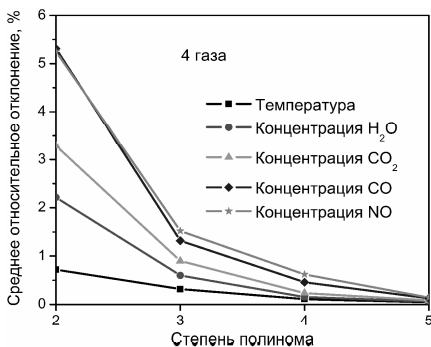


Рис. 2. Зависимость ошибки одновременного определения температуры и концентраций газов в составе смеси от максимальной степени полинома n в (1)

Таким образом, в настоящей работе показано, что точность определения температуры и концентраций газов в составе смеси в рамках метода аппроксимационных полиномов не изменяется при увеличении числа газов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Войцеховская О.К., Войцеховский А.В., Каширский Д.Е., Суслова И.С. Моделирование определения термодинамических параметров высокотемпературного газового объема пассивным дистанционным методом // Оптический журнал. 2010. Т. 77. № 9. С. 37–44.
2. Egorov O.V. et al. The optical method for determining the thermodynamic parameters of hot gases // J. Quant. Spec. Radiat. Transfer. 2014. V. 147. P. 38–46.
3. Voitsekhovskaya O.K., Egorov O.V., Kashirskii D.E., Emelyanov N.M. Application of the method of approximating polynomials for the determination of the temperature and concentration of hot carbon dioxide from its transmission spectrum // Russian Physics Journal. 2017. V. 60. P. 749–757.
4. Egorov O.V., Voitsekhovskaya O.K., Kashirskii D.E. Validation of the remote method of determining the temperature and concentration of high-temperature water vapor from the reference transmission spectra // Russian Physics Journal. 2018. V. 60. Iss. 11. P. 1961–1970.
5. Voitsekhovskaya O.K., Kashirskii D.E., Egorov O.V., Shefer O.V. Modeling absorption spectra for detection of the combustion products of jet engines by laser remote sensing // Applied Optics. 2016. V. 55. No. 14. P. 3814–3823.
6. Rothman L.S. et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database // J. Quant. Spec. Radiat. Transfer. 2010. V. 111. P. 2139–2150.

Егоров Олег Викторович, к.ф.-м.н., м.н.с.; egorov@mail.tsu.ru;

Каширский Данила Евгеньевич, к.ф.-м.н., доцент; kde@mail.tsu.ru