

УДК 535.33, 535.34

О.К. ВОЙЦЕХОВСКАЯ\*, Д.Е. КАШИРСКИЙ\*, Н.М. ЕМЕЛЬЯНОВ\*, В.М. САЗАНОВИЧ\*\*,  
Р.Ш. ЦВЫК\*\*, М.В. ШЕРСТОБИТОВ\*\*

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ ГАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПО СПЕКТРАЛЬНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПЛАМЕН<sup>1</sup>

Результаты экспериментов по определению оптических характеристик модельного огненного смерча, формируемого путем закрутки воздушного потока вращающимися лопастями над горелкой, использованы для выяснения газового состава продуктов сгорания и их относительных концентраций. Основным инструментом интерпретации экспериментальных данных послужил разработанный программно-вычислительный комплекс «TRAVA».

**Ключевые слова:** высокотемпературный газ, интенсивность излучения, коэффициент поглощения, термодинамические параметры.

Методам определения термодинамических параметров высокотемпературного газа, исходя из интенсивности излучения, поступившего на регистрирующее устройство, посвящен значительный ряд научных и прикладных работ, например [1–5]. Это связано с необходимостью информационного обеспечения и диагностирования технического состояния различных двигателей, турбин, плавильных печей и т.д. Решение этих задач базируется на моделировании спектральных характеристик излучения (поглощения) термодинамически неоднородных газовой-аэрозольных сред с большими градиентами температурных и концентрационных полей.

Рассматривались среды, представляющие собой смеси газов  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в различных соотношениях концентраций и при различных температурах. В расчетах использовались общепринятые допущения: диффузность излучения и наличие локального термодинамического равновесия. Проведенные расчеты позволяют выявить наиболее важные факторы, влияющие на достоверность вычислений излучательной способности газового объема (ширина и контур излучения, геометрия трассы, спектральное разрешение, температурное распределение и т.д.) и оценить адекватность экспериментальным значениям результатов расчета излучательных характеристик газовой фазы горения.

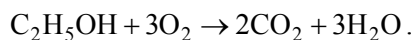
Разработанные ранее программные комплексы [6] выполняют разнообразные расчеты как параметров спектральных линий поглощения, так и предоставляют количественные данные по поглощению проходящего излучения дополнительного источника и собственному излучению газового объема. Но особый интерес вызывает решение обратной задачи – определение концентрации компонентов облака и его кинетической температуры из значений спектральных характеристик газовой фазы пламен, зарегистрированных фотоприемником. Непосредственно найти концентрацию конкретного газового компонента из уравнения переноса затруднительно, поскольку восстановление характеристик газового состава неоднородной среды связано с решением интегрального уравнения первого рода, каким является уравнение переноса. Традиционно используются или замена решения интегрального уравнения на систему линейных или нелинейных алгебраических уравнений с последующим применением методов решения таких систем, или нахождение малых вариаций искомого решения от модельных пространственных распределений температуры и концентраций газов в процессе итераций. В настоящее время достаточно подробно разработаны методы решения линейных обратных задач, которые позволяют получать также и погрешности определения искомого величин, поэтому сведение вычислительной схемы решения обратной задачи к максимально простому виду дает кратчайший путь к нахождению искомого характеристик. Это осуществляется параметризацией зависимостей функции пропускания (излучения) от условий поглощающей среды.

Верификация подобных методик проводится сравнением с результатами обработки реального эксперимента. В [7] зарегистрированы эмиссионные спектры пламени этанола (этилового спирта) в спектральном диапазоне 2,2–4,8 мкм ( $2050\text{--}4500\text{ см}^{-1}$ ). Описание установки и детали эксперимента даны в [8]. Использование в качестве регистратора спектрографа с дифракционной решет-

<sup>1</sup> Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение № 14.132.21.1586 и ГК № 14.514.11.4050.

кой позволило получить значительный массив данных по излучению пламени в узких спектральных интервалах.

Продуктами сгорания этанола являются водяной пар и углекислый газ согласно химической реакции



Соответственно парциальное давление компонентов газовой смеси прямо пропорционально числу его частиц  $P = nkT$ , и можно предположить априори соотношение 3:2 между концентрациями водяного пара и углекислого газа. Трудность в интерпретации данных [7] заключается в измерении относительных значений интенсивности излучения пламени, в то время как определение температуры и концентраций газов требует знания абсолютных величин.

Расчет спектральной интенсивности излучения выполнялся способом прямого полинейного счета с использованием программно-вычислительного комплекса «TRAVA» [6] в двух спектральных интервалах 2100–2400  $cm^{-1}$  (основной вклад в поглощение дает полоса  $CO_2$  4,3 мкм) и в 2800–3700  $cm^{-1}$  (полоса  $H_2O$  2,7 мкм). Длина оптического пути бралась равной 1 см. Форма аппаратной функции – прямоугольная. Спектральные интенсивности излучения рассчитывались для различных значений температуры и парциальных давлений водяного пара и углекислого газа.

На рис. 1 приведены спектральные интенсивности для смеси водяного пара и углекислого газа при температуре 1000 К. Поскольку эксперимент проводился на открытом воздухе, учитыва-

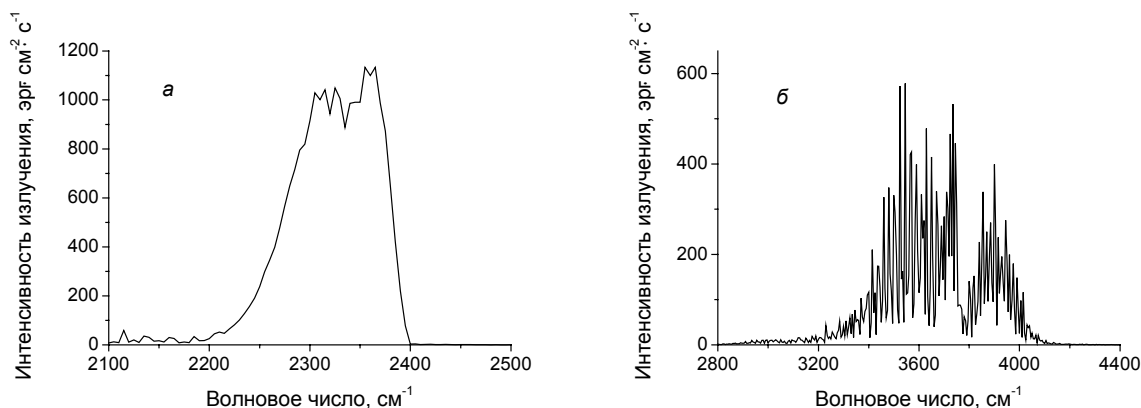


Рис. 1. Спектральные зависимости интенсивности излучения для спектрального интервала: *a* – 2100–2500  $cm^{-1}$ , *б* – 2800–4400  $cm^{-1}$

лось уширение спектральных линий поглощения воздухом, контур спектральных линий принимался лоренцевским. Спектроскопическая информация по параметрам спектральных линий (ПСЛ) поглощения использовалась из двух источников [9] и [10, 11]. Детальное рассмотрение показало необходимость дополнительного анализа параметров спектральных линий  $H_2O$  и  $CO_2$ . Для примера приводим результат расчета коэффициента поглощения водяного пара в сравнении с экспериментом [12] (рис. 2), откуда следует, что расхождения в значениях коэффициентов превышают погрешность эксперимента.

Ранее нами в [13] предложена инженерная методика определения термодинамических параметров высокотемпературного газа исходя из интенсивности излучения, поступившего на фотоприемник. Методика базируется на предварительном точном определении интенсивности излучения для конкретного спектрального диапазона и фиксированных интервалов температуры и парциальных давлений и аппроксимации зависимости интенсивности излучения от термоди-

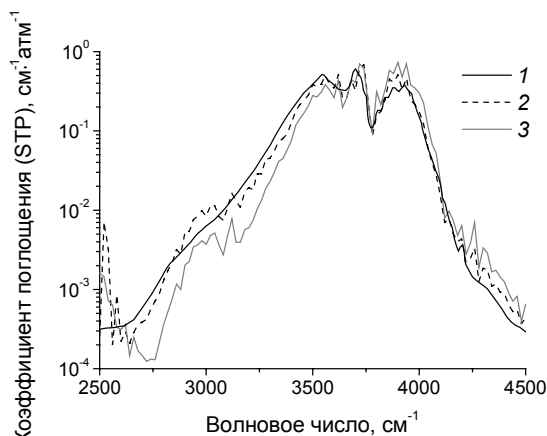


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента поглощения водяного пара при  $T = 1000$  К: 1 – эксперимент; 2 – расчет с [10]; 3 – расчет с [9]

намических параметров среды. Последнее осуществлено теоретическим расчетом с помощью информационно-вычислительной системы на примере угарного газа. Другой подход основывался на аппроксимации значений концентрации и температуры от интенсивности излучения в конкретных спектральных интервалах. Также апробировался вариант, в котором выбирались узкие спектральные участки, для которых справедливо приближение оптически тонкого слоя. Полученный набор данных по температуре и концентрации компонентов сред анализировался с привлечением статистических методов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Webber M.E., Wang J., Sanders S.T., et al. // Proc. Combust. Inst. – 2000. – V. 28. – P. 407–413.
2. Weidmann D. and Courtois D. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. – 2004. – V. 83. – P. 655–666.
3. Soufiani A. and Taine J. // Int. J. Heat. Mass. Transfer. – 1997. – V. 40. – No. 4. – P. 987–991.
4. Moskalenko N.I., Loktev N.F., and Zaripov A.V. // Proc. IVth Russian National Conference on Heat Transfer. – 2006. – P. 277–280.
5. Антипин М.Е., Войцеховская О.К. // Изв. вузов. Физика. – 2001. – Т. 44. – № 4. – С. 3–8.
6. Войцеховская О.К., Войцеховский А.В., Каширский Д.Е. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 9/3. – С. 157–158.
7. Шерстобитов М.В., Цвык Р.Ш. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 1. – С. 90–94.
8. Гришин А.М., Рейно В.В., Сазанович В.М. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 12. – С. 14–24.
9. Войцеховская О.К., Котов А.А., Черепанов В.Н., Запрягаев А.Ю. // Оптика атмосферы и океана. – 2003. – Т. 16. – № 9. – С. 835–845.
10. Rothman L.S., Gordon I.E., Barber R.J., et al. // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2010. – V. 111. – Is. 15. – P. 2139–2150.
11. <http://www.cfa.harvard.edu/hitran/HITEMP.html>
12. Ludwig C.B., Malkmus W., Reardon J.E., and Thomson J.A.L. Handbook of Infrared Radiation from Combustion Gases. – Washington: NASA, 1973. – 500 p.
13. Войцеховский А.В., Войцеховская О.К., Каширский Д.Е., Суслова И.С. // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 9. – С. 37–44.

\*Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 15.07.13.

\*\*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия  
E-mail: vok@elefot.tsu.ru

Войцеховская Ольга Кузьминична, д.ф.-м.н., профессор;  
Каширский Данила Евгеньевич, аспирант;  
Емельянов Никита Михайлович, студент;  
Сазанович Валентина Михайловна, к.ф.-м.н., ст. науч. сотр.;  
Цвык Рувим Шахнович, к.ф.-м.н., ведущ. науч. сотр.;  
Шерстобитов Михаил Валентинович, науч. сотр.

*O.K. VOITSEKHOVSKAYA, D.E. KASHIRSKII, H.M. EMELYANOV, V.M. SAZANOVICH,  
R.Sh. TSVYK, M.V. SHERSTOBITOV*

### DETERMINATION OF CONCENTRATIONS OF COMBUSTION GASES FROM THE FLAME SPECTRAL CHARACTERISTICS

The results of experiments to determine the optical properties of the model fire tornado, formed by swirling air flow blades rotating above the burner used to elucidate the gas composition of the combustion products and their relative concentrations. The developed information system «TRAVA» served as main tool for the interpretation of experimental data.

**Keywords:** high-temperature gas, the radiation intensity, absorption coefficient, the thermodynamic parameters.