

Н.И. Москаленко, Н.Ф. Локтев, А.В. Зарипов

Казанский государственный энергетический университет, Россия

ДИАГНОСТИКА ПЛАМЕН И ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ОПТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются результаты экспериментальных исследований высокоразрешенных спектров излучения газовых компонентов продуктов сгорания и пламен. Разработан метод восстановления истинных (монохроматических) спектров излучения из измеренных спектров, отягощенных аппаратными искажениями, с последующим их использованием для получения структурных характеристик пламен и продуктов сгорания. Анализируются решения полного уравнения переноса излучения и выполнен анализ решений в целях выявления вкладов различных факторов, влияющих на величину спектральной интенсивности излучения. Выявлены наиболее информативные оптические каналы для последующей разработки аппаратуры дистанционного зондирования структурных характеристик продуктов сгорания и пламен. Анализируются различные оптические методы для дистанционного зондирования полей температуры.

1. ВВЕДЕНИЕ

Решение задач радиационного теплообмена в топочных устройствах, в энергетических и энерготехнологических агрегатах сопряжено со значительными трудностями, обусловленными неоднородностью поля температуры, влиянием неравновесных процессов излучения, как результата проявления химлюминисценции при горении топлива, многокомпонентностью ингредиентного состава топлива. Структурные характеристики продуктов сгорания по объему топочного пространства определяются как процессом горения, так и процессами тепло- и массообмена, а также радиационного выхолаживания продуктов сгорания в замкнутом объеме топки или в свободной атмосфере. Процессы горения сопровождаются изменением химического состава дисперсной фазы самого топлива и генерацией золы в самом топочном пространстве в результате лопания капель топлива при их дегазации и нуклеации сажевых частиц из газовой фазы. Высокие температуры топочного пространства делают затруднительным измерение его структурных характеристик контактным методом, поэтому в настоящей работе рассматриваются возможности их получения оптическими методами, не требующими контакта измерительной аппаратуры с исследуемой средой. Наличие отражающих излучений стенок и дисперсной фазы в топочном объеме приводит к перемешиванию излучений всего топочного пространства и стенок топки. В связи с чем анализируются решения полного уравнения переноса излучения и выполняется факторный анализ формирова-

ния спектральной интенсивности излучения в целях выявления влияния вкладов различных факторов на величину интенсивности излучения и их влияния на ее структуру. Такой анализ позволяет выявить наиболее информативные оптические каналы для последующей разработки аппаратуры дистанционного зондирования в пассивном и активном вариантах измерений.

2. ИНФОРМАЦИОННОЕ СОДЕРЖАНИЕ СПЕКТРОВ ИЗЛУЧЕНИЯ

Анализ результатов измерений и численного моделирования радиационных характеристик продуктов сгорания показал, что информативность дистанционного зондирования структурных характеристик пламен и продуктов сгорания возрастает с увеличением спектрального разрешения спектрометра. В связи с этим разработана математическая модель численного моделирования переноса излучения для получения спектров интенсивностей излучения с любым спектральным разрешением, которое определяется аппаратной функцией спектроанализатора. При этом используется тонкая параметризация радиационных характеристик продуктов сгорания, основанная на экспериментальных данных по параметрам спектральных линий газовых компонентов и их квантово-механических расчетах. Оптические характеристики дисперсной фазы продуктов сгорания получены путем расчетов по теории Ми с учетом выгорания частиц самого топлива и механизмов генерации тонкодисперсной фракции золы в топочном пространстве.

Основной характеристикой, определяющей радиационное выхолаживание продуктов сгорания, является трехмерное поле температуры и концентраций оптически активных ингредиентов, поглощающих излучение, сформированного вне элементарного объема и излучающего в элементарном объеме. Если среда однородна, то из измерений абсолютной спектральной яркости и функции спектрального пропускания для неселективного излучения, можно получить спектральную функцию источника излучения, входящую в решения уравнения переноса излучения. Если спектральная яркость источника является функцией Планка, то среда является равновесной. Если измеренная спектральная яркость источника превосходит излучение абсолютно черного тела, то среда является неравновесной и функция источника определяется нами как произведение функции Планка на коэффициент неравно-

вности η_{λ} , который вводится для каждого ингредиента i . Для равновесно излучающих компонентов $\eta_{i\lambda} = 1$, для неравновесно излучающих компонентов $\eta_{i\lambda} > 1$ [1—3].

Равновесно излучающие компоненты могут использоваться для измерения температуры пламени (среды) методом самообращения спектральных линий, который не требует знания концентрации компонента для определения температуры пламени. В дальнейшем эта температура может использоваться для определения концентрации ингредиентов по измеренным функциям спектрального пропускания неселективного излучения пламенем или измеренным интенсивностям спектральных линий поглощения. Если среда является неравновесной, то метод самообращения спектральных линий позволяет определить колебательную температуру перехода неравновесно излучающего компонента. В работе [4] измерение температуры выполняется по спектральной яркости излучения в «черной» линии, для которой величина $(1-\tau_{\lambda}) = 1$, где τ_{λ} — функция спектрального пропускания.

В настоящей работе нами предложен алгоритм для определения температуры по измеренному отношению интенсивностей двух спектральных линий паров H_2O , излучение которых является равновесным. Этот метод требует измерения спектров излучения или поглощения с высоким спектральным разрешением. Измеренные спектры $(-\ln \tau_{\delta\lambda})$ при этом разлагаются на индивидуальные линии поглощения путем разложения спектра $|\ln \tau_{\delta\lambda}|$ в ряд Тейлора с последующим применением обратного преобразования для определения коэффициентов в разложении. Последующей операцией восстанавливается истинный спектр величины $|\ln \tau_{\lambda}|$, из которого по интенсивности линий поглощения паров H_2O определяется температура, а по интенсивности спектральных линий других компонентов определяются их концентрации.

Измерение температуры продуктов сгорания можно осуществить по функции спектрального пропускания излучения CO_2 -лазера в линиях CO_2 -компонента продуктов сгорания в «горячей» полосе 10,6 мкм. При этом возможно использование функции пропускания излучения CO_2 -лазера, работающего на линии перехода с вращательным квантовым числом $j = 20$, коэффициенты поглощения которого в зависимости от температуры получены в [5]. Сильная температурная зависимость коэффициента поглощения излучения CO_2 -лазера позволяет измерить температуру продуктов сгорания с высокой точностью. При численном моделировании коэффициента поглощения излучения CO_2 -лазера необходимо учитывать отличия контура спектральной линии поглощения от Лоренцевского [6]. Экспоненциальный спад крыла спектральной линии CO_2 , обнаруженный экспериментально, приводит к усилению поглощения в центре спектральной линии, что и подтвердили результаты [5].

Дистанционное зондирование дисперсной фазы продуктов сгорания в целях определения микроструктуры генерированного в топочном простран-

стве золя и его массовой концентрации достаточно проблематично в связи с наличием неравновесного излучения в электронных спектрах излучения газовой фазы продуктов сгорания, сильным поглощением излучения золем и слабым рассеянием излучения в заднюю полусферу. В связи с этим достоверную информацию по концентрации и микроструктуре золя можно получить путем спектрального анализа отобранных проб продуктов сгорания при более низких температурах с использованием подогретой многоходовой кюветы в качестве рабочей камеры. Спектральная зависимость ослабления излучением золя и его массовой концентрации. Выполненные измерения спектров ослабления излучения дымовых газов показали, что спектральный метод определения микроструктуры и массовой концентрации золя достаточно эффективен.

3. ДИСТАНЦИОННАЯ ИНДИКАЦИЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для дистанционной индикации структурных характеристик продуктов сгорания полезным сигналом является спектральная интенсивность их излучения, которую можно записать в виде

$$I_{\lambda}^{об} = \int_{L^{об}} B_{\lambda}[T(L)] \frac{\partial \tau_{\lambda}(L)}{\partial L} dL, \quad (1)$$

где $B_{\lambda}[T(L)]$ — функция источника излучения (для равновесных процессов функция Планка спектральной яркости излучения абсолютно черного тела) в точке L , с температурой T ; $\tau_{\lambda}(L)$ — функция спектрального пропускания в направлении наблюдения L . Интегрирование проводится в пределах границ объекта наблюдения $L_{об}$.

Перепишем соотношение (1) в виде

$$I^{об}(L) = \bar{B}_{\lambda} \int_{L^{об}} \frac{\partial \tau_{\lambda}(L)}{\partial L} dL = \bar{B}_{\lambda} [1 - \tau_{\lambda}^{об}(L)], \quad (2)$$

где \bar{B}_{λ} — среднее значение температуры T на длине волны λ ; функция спектрального пропускания $\tau_{\lambda}^{об}(L)$ учитывает поглощение излучения всеми оптически активными компонентами, включая дисперсную фазу продуктов сгорания, и с погрешностью не более 1 % описывается законом произведения

$$\tau_{\lambda}(L) = \prod_i \tau_{\lambda_i}(L), \quad (3)$$

где произведение берется по всем компонентам i газовой и дисперсной фазы.

Функция $\tau_{\lambda}^{об}$ для газов обладает острой селекцией, то время как функция спектрального пропускания золя в соотношении (3) учитывает только поглощение излучения золем

$$\tau_{\lambda_3}^{об} = e^{-\sigma_{\lambda}^a L_{об}}, \quad (4)$$

где σ_{λ}^a — объемный коэффициент поглощения излучения золем.

В соотношении (3) функция спектрального пропускания $\tau_{\lambda_i}^{об}$ определяется для аппаратной функ-

ции $\delta(\lambda)$, которая должна быть достаточно узкой, чтобы обеспечить идентификацию ингредиентов по специфической структуре колебательно-вращательных полос $\tau_{\lambda_i}^{об}(L)$. Из соотношения (3) следует, что чем выше спектральное разрешение спектра радиометра, тем с большей достоверностью может быть определено содержание ингредиента на пути излучения. Обратим внимание на то, что соотношение (2) не учитывает рассеяния излучения дисперсной фазой и отражение излучения стенками камеры сгорания. Точные алгоритмы для расчета достаточно громоздки и рассмотрены нами в [4,7]. Уменьшение пространственного разрешения снижает достоверность определения концентраций ингредиентов.

Если разложить функцию излучения Планка в ряд Тейлора, то получим:

$$B_v(T) - B_v\left(\bar{T}\right) = h(L) \frac{\partial B_v\left(\bar{T}\right)}{\partial T}. \quad (5)$$

где $h(L) = T(L) - \bar{T}(L)$.

Тогда уравнение (1) можно привести к виду

$$r_{\delta_v} = \int_0^L k_v(L) h(L) dL. \quad (6)$$

Если

$$k_v(L) = \frac{\partial \tau_{\delta_v}(L)}{\partial L} \frac{\partial B\left(\bar{T}\right)}{\partial T}. \quad (7)$$

Тогда

$$r_{\delta_v} = I_{\delta_v} - B_v\left[T(L_{тр})\right] + \int_{L_{тр}}^{L^{об}} B_v\left[\bar{T}(L^{об})\right] \frac{\partial \tau_{\delta_v}(L)}{\partial L} dL \quad (8)$$

где $B_v\left[T(L_{тр})\right]$ — излучение стенки камеры сгорания.

Вследствие того, что r_{δ_v} известна с некоторой случайной ошибкой $\varepsilon(L)$

$$r_{\delta_v}(L) = \bar{r}_{\delta_v}(L) + \varepsilon(L). \quad (9)$$

Предполагается, что в ошибку $\varepsilon(L)$ входят не только ошибки измерений интенсивности излучения, но и погрешности задания ядра уравнения $k_v(L)$,

которые определяются весовой функцией $\frac{\partial \tau_{\delta_v}}{\partial L}$.

Необходимым условием решения уравнения (8) является гладкость его ядра. Если $k_v(L) = \text{const}$, то функция r_{δ_v} не содержит ни какой информации о профиле температуры. Чем более избирательно ядро $k_v(L)$, тем больше информации оно несет о профиле температуры вдоль оптического пути L .

Присутствие случайных ошибок в значениях избирательных величин r_{δ_v} приводит к неоднородности решения уравнения (8). Последнее снимается путем регуляризации некорректной задачи. Для ее проведения необходима некоторая априорная информация об искомом решении [6,8].

Выполненный анализ весовых функций $\frac{\partial \tau(L)}{\partial L}$

показал, что наиболее перспективны для дистанционного зондирования температуры в продуктах сгорания оптические каналы в полосе 4.3 мкм CO_2 . При этом предполагается, что пространственное распределение последнего известно. Полезно исследовать корреляционные зависимости распределения концентрации CO_2 и температуры в струйных течениях. Наиболее достоверная информация восстановленных профилей температуры наблюдается при использовании 4—6 наиболее информативных оптических каналов при спектральном разрешении $\Delta = 1 - 2 \text{ см}^{-1}$. Использование большего числа каналов уменьшает точность восстановления температурного распределения по объему камеры сгорания.

При дистанционной индикации распределения газовых компонентов по объему камеры сгорания или атмосферных выбросов продуктов сгорания методом спектро радиометрии необходимо знать распределение температуры вдоль линии визирования спектро радиометра. Выполненные нами измерения и моделирование оптических характеристик дисперсной фазы продуктов сгорания показали, что золь продуктов сгорания является сильно поглощающим излучением. При этом рассеяние излучения в заданную полусферу практически отсутствует. Это дает основание сделать вывод, что на величину спектральной интенсивности регистрируемого спектро радиометром излучения влияют только преимущественно спектральные коэффициенты поглощения золя. Наибольшей информативностью для определений концентраций ингредиента является излучение самой среды вдоль направления наблюдения, которой запишется в виде

$$I_\lambda = \int_{L^{тр}}^{L^{об}} B_\lambda \cdot [T(L)] \frac{\partial \tau_\lambda(L)}{\partial L} dL, \quad (10)$$

где $B_\lambda [T(L)]$ — функция источника, в точке L оптического пути. Интегрирование выполняется от пересечения линии выравнивания с границей (стенкой камеры) до $L^{об}$ — расстояния до объектива радиометра. Если среда излучает равновесно, то $B_\lambda [T(L)]$ функция Планка спектральной яркости для абсолютно черного тела с локальной термодинамической температурой T .

Перепишем соотношение (10) в виде

$$I_\lambda = \beta_\lambda \int_{L^{тр}}^{L^{об}} \frac{\partial \tau_\lambda(L)}{\partial L} dL = \beta_\lambda \left[1 - \tau_\lambda(L^{тр}, L^{об}) \right], \quad (11)$$

где β_λ — среднее значение спектральной яркости при некоторой средней температуре T на длине волны λ . Функция спектрального пропускания $\tau_\lambda(L^{тр}, L^{об})$ учитывает поглощение излучения всеми оптически активными компонентами, включая дисперсную фазу, и с погрешностью не более 1 % описывается законом произведения

$$\tau_{\lambda}(L^{\text{ГР}}, L^{\text{Об}}) = \prod_i \tau_{\lambda i}(L^{\text{ГР}}, L^{\text{Об}}), \quad (12)$$

где произведение берется по всем компонентам i газовой и дисперсной фаз продуктов сгорания.

Функция спектрального пропускания $\tau_{\lambda}(L^{\text{ГР}}, L^{\text{Об}})$ для газов обладает острой спектральной селективностью, в то время как функция спектрального пропускания золя спектрально слабо структурирована, что позволяет разделить излучение разных фаз. Заметим, что функция спектрального пропускания золя в соотношении (12) учитывает поглощение излучения дисперсной фазой

$$\tau_{\lambda \text{ аэр}} = e^{-\left[\int_{L^{\text{ГР}}}^{L^{\text{Об}}} \sigma_{\lambda}^a(L) dL \right]}, \quad (13)$$

где $\sigma_{\lambda}^a(L)$ — объемный коэффициент поглощения излучения аэрозолем (дисперсной фазой) вдоль оптического пути L .

При регистрации излучения факела в атмосфере необходимо учитывать ослабление излучения атмосферой. Тогда регистрируемый отклик сигнала определится соотношением

$$I_{\lambda} = \bar{\beta}_{\lambda} \left[1 - \prod_i \tau_{\lambda i}(L^{\text{Об}}, L^{\text{ГР}}) \right] \tau_{\lambda}^a(L_{\text{атм}}), \quad (14)$$

где $\tau_{\lambda}^a(L_{\text{атм}})$ — передаточная функция атмосферы.

В соотношении (14) функция спектрального пропускания $\tau_{\lambda i}(L^{\text{Об}}, L^{\text{ГР}})$ и передаточная функция $\tau_{\lambda}^a(L_{\text{атм}})$ должны быть получены для аппаратной функции $\delta(\lambda)$ спектрометра, которая должна быть достаточной узкой, чтобы обеспечить идентификацию ингредиентов по специфической структу-

ре $\tau_{\lambda i}(L^{\text{Об}}, L^{\text{ГР}})$ колебательно-вращательных полос.

Из соотношения (14) можно видеть, что разделение $\tau_{\lambda i}(L^{\text{Об}}, L^{\text{ГР}})$ на индивидуальные компоненты можно выполнить более точно в окнах прозрачности атмосферы с максимальными величинами $\tau_{\lambda}^a(L_{\text{атм}})$. Наиболее информативными будут спектральные каналы измерений, в которых величины I_{λ} принимают максимальные значения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аппаратура** для комплексных исследований характеристики молекулярного поглощения радиации атмосферными газами / Н.И. Москаленко и др. // ЖПС. 1973. Т.19. №4. С. 752—756.
2. **Спектральная** установка для исследований характеристики молекулярного поглощения и измерения в высокотемпературных средах / Н.И. Москаленко и др. // ЖПС. 1980. Т.32. №2. С. 377—381.
3. **Москаленко Н.И., Ильин Ю.А., Каюмова Г.В.** Измерительный комплекс высокого спектрального разрешения для исследований пламени // ЖПС. 1992. Т.56. №1. С. 122—127.
4. **Москаленко Н.И., Миниханова Э.И.** Исследование роли неравновесных процессов в радиационном выхолаживании продуктов сгорания топочной камеры // Проблемы энергетики. 2006. №1, 2. С. 30—45.
5. **Москаленко Н.И., Зотов О.В., Дугин В.Л.** О поглощении излучения ОКГ на смеси He – CO₂ газами CO₂, NH₃ и парами H₂O // ЖПС. 1972. Т.17. №5. С. 881—884.
6. **Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И.** Тепловые измерения планет. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 264 с.
7. **Москаленко Н.И., Филимонов А.Г.** Моделирование переноса теплового излучения в высокотемпературных средах // Проблемы энергетики. 2002. №1,2. С. 27—41.
8. **Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М.** Термическое зондирование атмосферы со спутников. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 409 с.