

Р.Ш. Цвык

Прозрачность пламени при горении лесных горючих материалов

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 16.09.2002 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований спектральной прозрачности пламени при горении лесных горючих материалов (хвоя кедра) в диапазоне 0,6–5,5 мкм. Высота над поверхностью горения составляла 10 см. Моделировались условия среднего низового пожара при отсутствии ветра.

Введение

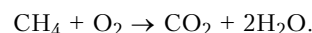
Горение в общем случае – очень сложный химический процесс, который часто состоит из ряда химических реакций, протекающих последовательно и одновременно. В процессе горения образуются промежуточные химические компоненты. Состав и концентрацию этих промежуточных компонентов обычно нельзя определить с достаточной точностью. В то же время радиационные и оптические свойства пламени зависят от распределения химических компонентов и температуры в зоне горения. Поэтому подробный расчет радиационных и оптических свойств пламени часто бывает невозможным, если известны только исходные продукты горения и геометрия пламени [1, 2].

Химический состав большинства лесных горючих материалов (ЛГМ) изучен недостаточно. Основными компонентами сухого опада растительности (ветки, хвоя, листья) являются: зола (1–7,9%), углеводы (целлюлоза 37–44% и гемицеллюлоза 9–21%) и лигнин (32–38%). Целлюлоза представляет собой полисахарид состава $(C_6H_{10}O_5)_n$ с молекулярной массой 80000–150000. Это сравнительно устойчивое соединение, которое при обычных условиях не растворяется в воде и не разлагается на воздухе. Гемицеллюлозы имеют аналогичное химическое строение, но наряду с шестиглеродными звеньями $(C_6H_{10}O_5)$ их полимерные цепи содержат пятиглеродные звенья $(C_5H_8O_4)$. Эти соединения неустойчивы. В отличие от целлюлозы, легко гидролизуются и разлагаются при нагревании с образованием CO_2 , H_2O и CH_4 . В интервале температур 493–578 °С происходит их полное разложение. Лигнин – высокомолекулярное соединение, заполняющее межклеточное пространство и относительно легко окисляющееся. Строение его молекул до конца не расшифровано. В небольших количествах ЛГМ содержат соединения металлов [3].

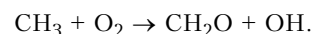
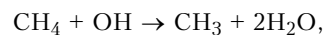
Основными продуктами при горении ЛГМ являются углекислый газ, водяной пар, зола, а промежуточными – древесный уголь (коксык на 80–90% состоит из углерода) и газообразные продукты разложения, которые состоят из CO , CH_4 , C_2H_6 , H_2 , терпенов $C_{20}H_{30}O_2$ и непредельных углеводородов [3].

Процесс горения горючих газообразных продуктов разложения включает в себя целый ряд промежуточных реакций, в которых участвуют молекулярные частицы с высокой химической активностью (атомы и свободные радикалы): H^{\bullet} , $\bullet OH$ и $\bullet CH_3$. Хотя эти атомы и свободные радикалы существуют в пламени лишь короткое время, они обеспечивают быстрый расход горючего. Концентрация этих молекулярных фрагментов поддерживается благодаря их непрерывному воспроизводству в результате последовательности реакций [2].

Например, метан горит с образованием CO_2 и H_2O в соответствии с реакцией



Однако цепочка промежуточных реакций горения метана значительно сложнее, и количество этих цепочек может быть очень большим (достигает 30). Например, цепочка с образованием промежуточного продукта – формальдегида CH_2O [2] имеет следующий вид:



При полном сжигании формальдегид по различным цепочкам окисляется и превращается в CO , который, в свою очередь, окисляется до конечного продукта CO_2 по цепочке $CO + \bullet OH \rightarrow CO_2 + \bullet H$. При неполном сгорании (недостатке гидроксильной группы $\bullet OH$) в продуктах горения появляются формальдегид и оксид углерода [2].

Кроме газообразных продуктов при горении ЛГМ образуются частицы сажи в виде сферических частиц, агломератов, а иногда в виде нитей. В область горения вовлекаются также частицы из окружающей среды и частицы несгоревшего вещества. Оптические свойства частиц сажи зависят от источника генерации и исследованы недостаточно [2].

Влияние непрерывно генерируемых при горении ЛГМ частиц, продуктов пиролиза и промежуточных продуктов химических реакций окисления приводит к сложной и изменчивой структуре спектральной прозрачности и спектрального состава излучения пламени. В обзоре [4] отмечено, что при сжигании растительности

различных видов кроме углекислого газа, паров воды, окиси углерода, наблюдались значительные количества формальдегида, метанола, паров уксусной и муравьиной кислот, метана, ацетилена, этилена, изобутена, соединений азота и другие малые газовые примеси. Подчеркнуто, что имеются значительные расхождения в экспериментальных данных о количестве соединений азота, переходящего в газовую фазу.

Сложность и неоднозначность процессов поглощения и излучения, генерации аэрозольных частиц, химических процессов окисления при горении ЛГМ требуют дальнейшего проведения экспериментальных исследований оптических и физических характеристик таких сред. Эта информация необходима для оценки влияния пожаров на атмосферные процессы, для уточнения математических моделей лесных пожаров, для возможности определения выбросов вредных веществ. В данной статье приводятся результаты экспериментальных исследований спектральной прозрачности пламени при горении опада хвои кедра.

Методика и результаты исследований

Исследования проводились на столе-полигоне размером 0,8×3,6 м, покрытом 200-мм слоем земли и установленном в большой аэрозольной камере диаметром 10 м, длиной 26 м, оборудованной двумя вентиляционными отверстиями диаметром 600 мм. Условия эксперимента позволяли моделировать низовой, лесной пожар при естественной конвекции без ветра. ЛГМ укладывался равномерно на площади 0,4×0,4 м. Поджиг ЛГМ осуществлялся дистанционно вдоль одной боковой стороны с помощью электрической спирали, уложенной под ЛГМ.

В качестве источника излучения применялся стержень из карбида кремния диаметром 8 мм (модель АЧТ) с температурой 1300–1500 К. Излучение модулировалось модулятором частотой 1300 Гц, проходило через пламя перпендикулярно направлению движения фронта горения и направлялось в монохроматор МДР-6У со сменными дифракционными решетками. Для уменьшения времени сканирования была проведена модернизация системы развертки монохроматора. Время регистрации одного спектра составило 6,5 с. Изображение источника излучения на входной щели монохроматора формировалось линзой из КВг, установленной перед монохроматором. Применялись фотоприемники: ФУО-614-5 для диапазона длин волн 1,5÷6 мкм (размер приемной площадки 2×2 мм) и ФЭУ-83 для области 0,4–1,1 мкм. Сигнал с фотоприемника усиливался селективным усилителем, детектировался, оцифровывался 12-разрядным АЦП, вводился и обрабатывался на ЭВМ. При измерении спектрального состава излучения пламени оптическая система настраивалась на область пламени. Калибровка по длинам волн проводилась с использованием интерференционных фильтров и по линиям поглощения парами воды и углекислого газа. Спектральная прозрачность рассчитывалась как отношение спектров излучения, прошедшего через пламя, к спектру излучения стержня при отсутствии

пламени. Это позволило исключить влияние спектра излучения самого стержня, поглощение парами воды и углекислым газом в чистой атмосфере и уточнить калибровку монохроматора по длинам волн. Ошибка измерений по АЧТ составила примерно 5%.

Результаты измерений

При горении горючих материалов выделяются различные газы, отличающиеся концентрацией, спектрами поглощения и коэффициентами излучения (степень черноты). Основными из них являются пары воды и углекислый газ. Они считаются основными газами, ответственными за поглощение и излучение при горении. В то же время малые газовые примеси могут играть существенную роль в процессе горения и выброса вредных веществ в атмосферу. Кроме того, за счет поглощения они увеличивают саморазогрев среды и ее температуру, дают возможность по их собственному излучению обнаружить источник горения на ранней стадии.

В подтверждение сложности спектров пропускания и излучения на рис. 1, 2 приведены примеры для ИК-диапазона: расчетная и измеренная спектральная прозрачность, а также спектры излучения пламени. Расчетные данные получены для температуры среды 500 К и смеси различных газов с использованием таблиц спектров поглощения и пакета программ «Атмосферная спектроскопия» Института оптики атмосферы. Для более высоких температур данные в пакете программ отсутствуют. Результаты, приведенные на рис. 1, б, в, 2, б, в, получены на монохроматоре МДР-6У (дифракционные решетки 300 и 600 штр./мм соответственно) [6]. По вертикальной оси на рис. 1, в, 2, в отложены амплитуды сигнала. Увеличение сигнала на рис. 2, в по сравнению с рис. 1, в обусловлено уменьшением спектрального разрешения решетки и повышением чувствительности фотоприемника. Значение прозрачности больше 1 (см. рис. 1, б) обусловлено ошибками измерений.

Кривые на рис. 1, б, в и 2, б, в соответствуют различным участкам движущегося пламени, которое проходит через поле зрения монохроматора: 1 – передняя часть фронта, 2 – тыльная, 3 – вблизи центра. Спектры вблизи центра получены как среднее по 2–3 спектрам, измеренным последовательно в течение одного эксперимента. На расчетных спектрах рис. 1, а и 2, а приведены поглощающие газы, а на спектрах излучения рис. 1, в, 2, в – идентифицированные газы, ответственные за излучение. На рис. 1, б, 2, б по левой шкале отложено измеренное пропускание $T(\lambda)$, а по правой – коэффициент ослабления α (м^{-1}), рассчитанный по закону Бугера.

Как показали исследования, в передней и тыльной частях пламени температура значительно ниже максимальной, достигаемой в центре пламени [3, 5]. Распределение температуры в направлении движения фронта горения (координата x) достаточно хорошо описывается гауссоидой [5]:

$$T(x, z) = T_m \exp\left(-\left[\frac{x-x_0}{a_T}\right]^2\right) + T_0,$$

где T_m – температура в максимуме ($700 \div 1200$ К, в зависимости от материала); a_T – полуширина пламени конвективной колонки (2–5 см); T_0 – температура окружающей среды; x_0 – координата точки максимума, определяемая начальным положением термопары относительно спирали поджига.

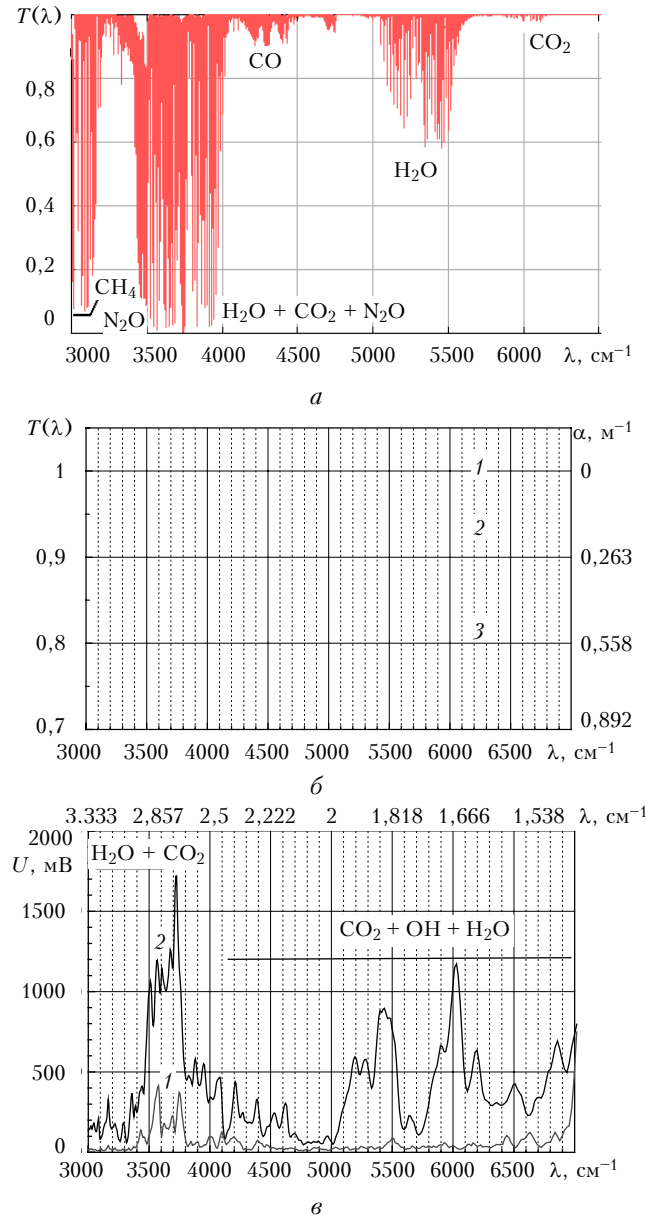


Рис. 1. Примеры расчетной (а), измеренной (б) спектральной прозрачности и спектров излучения (в) при горении опада хвои кедр в диапазоне $3000\text{--}7000$ cm^{-1}

Такое распределение температуры приводит к неравномерному пиролизу ЛГМ и, как следствие, должно привести к зависимости по сечению пламени (координата x) коэффициентов поглощения газовых компонентов, концентрации частиц сажи, образующихся при неполном сгорании газов, частиц золы, выносимых восходящим потоком воздуха, и аэрозольных частиц, вовлекаемых из окружающей среды.

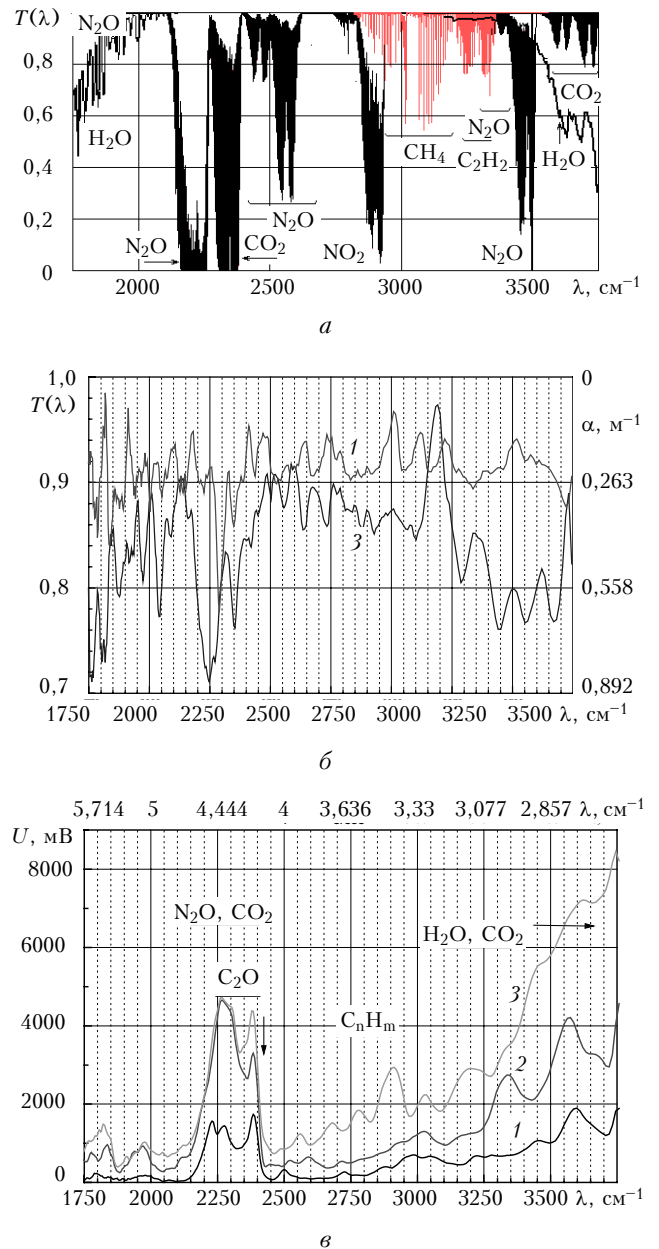


Рис. 2. Примеры расчетной (а), измеренной (б) спектральной прозрачности и спектров излучения (в) при горении опада хвои кедр в диапазоне $1750\text{--}4000$ cm^{-1}

Результаты исследований показали, что общее спектральное ослабление излучения, прошедшего через пламя, складывается из двух компонент. Первая – слабо меняющаяся с длиной волны составляющая (постоянная) (см. рис. 1, б, 2, б), определяемая ослаблением аэрозолям, и вторая – спектральные полосы (переменная составляющая), обусловленные поглощением газовых компонентов. Обе составляющие максимальны в центре пламени (кривые 3 на рис. 1, б и 2, б) и уменьшаются в передней и тыльной частях (кривые 1, 2 на рис. 1, б, кривая 1 на рис. 2, б). Аналогично изменяется и собственное излучение пламени (см. рис. 1, в, 2, в). Такое поведение может быть связано не только

с зависимостью коэффициента поглощения газовых составляющих от температуры и распределением их концентрации, но и, возможно, с обеспечением кислородом процесса горения. В переднюю и тыльную части пламени непрерывно поступает воздух с атмосферной концентрацией кислорода, а в центральную часть – с пониженной, за счет его выгорания по мере поступления в центр. Известно, что недостаток кислорода приводит к неполному сгоранию горючих газов, увеличению образования частиц сажи и появлению промежуточных продуктов горения [1]. Отметим, что в пламени первыми появляются и последними исчезают основные продукты горения – пары воды и углекислого газа.

По уровню постоянной и переменной составляющих можно оценить коэффициенты аэрозольного ослабления и идентифицировать поглощающие газы. В области 1,5–6 мкм удается идентифицировать практически все полосы поглощения и излучения основных, известных трехатомных газов – CO_2 , H_2O , N_2O (см. рис. 1, 2). Отличительной особенностью этих газов при горении материалов являются достаточно высокая их концентрация, большое количество сильных полос поглощения в инфракрасной области спектра и, как следствие, достаточно высокие коэффициенты поглощения и излучения. Линии поглощения малых примесей, таких как углеводороды, группа OH , NO , NO_2 , CO и др., трудно идентифицировать на фоне изменяющегося сигнала. Отметим, что группа OH имеет большое количество линий поглощения – от 1 до 4,4 мкм и все они наблюдались в выхлопной струе ракетных двигателей [7].

В видимом диапазоне длин волн наблюдается большое количество линий поглощения и излучения. Удалось идентифицировать только некоторые полосы паров воды и кислорода. Возможно, большое количество полос объясняется разложением хлорофилла, наличием в материале малых концентраций металлов. Этим же можно объяснить и желтый цвет пламени, радиационная температура которого, измеренная пирометром с исчезающей нитью, на 200–300° выше термодинамической. Нагретые частицы, считающиеся источником типа черного тела, не могут обеспечить такой поток излучения в видимом диапазоне.

Коэффициент аэрозольного ослабления α_a , определенный по уровню постоянной составляющей, слабо зависит от длины волны в области 2–6 мкм и составляет $\sim 0,15\text{--}0,2\text{ м}^{-1}$. В диапазоне 0,6–1 мкм $\alpha_a \sim 0,6\text{--}0,8\text{ м}^{-1}$ и растет с уменьшением длины волны. В областях поглощения газов, которые удалось четко идентифицировать, общий коэффициент ослабления α в максимуме составил: $\sim 0,8\text{ м}^{-1}$ в области 2,7 мкм H_2O ; $\sim 0,82\text{ м}^{-1}$ в области 4,3 мкм CO_2 ; $\sim 0,85\text{ м}^{-1}$

в области 4,49 мкм N_2O . В диапазоне 0,6–1 мкм $\alpha \approx 0,9\text{--}1,5\text{ м}^{-1}$ в области 0,9 мкм H_2O и $\sim 1\text{--}1,5\text{ м}^{-1}$ в области 0,76 мкм O_2 . Достаточно большое количество линий поглощения, особенно в видимом диапазоне, идентифицировать пока не удается.

Выводы

Спектры поглощения и излучения среды в области горения горючих материалов имеют сложный характер. На некоторой слабо меняющейся с длиной волны составляющей, слабо определяемой, в основном, сплошным спектром ослабления различными частицами, имеется большое количество линий поглощения и излучения. Это связано с тем, что пламя представляет собой высокотемпературную среду, в которой непрерывно идут химические процессы окисления, генерации продуктов горения и аэрозольных частиц. Причем все процессы флуктуируют в пространстве и времени. Поэтому некоторые полосы поглощения и излучения появляются лишь на короткое время. Идентифицировать удается полосы поглощения основных, известных трехатомных газов: CO_2 , H_2O , N_2O . Линии поглощения малых примесей трудно идентифицировать на фоне изменяющегося сигнала.

Наличие отдельных полос поглощения в видимой и ИК-областях создает предпосылку для поиска длин волн, в которых ослабление сигнала минимально, и использовать их для наблюдения объектов через пламя.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 00-02-16747).

1. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975. 937 с.
2. Драздейл Д. Введение в динамику пожаров. М.: Стройиздат, 1990. 330 с.
3. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 408 с.
4. Кондратев К.Я., Исидоров В.А. Воздействие сжигания биомассы на химический состав атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2001. Т. 14. № 2. С. 106–115.
5. Сазанович В.М., Цвык Р.Ш. Экспериментальные исследования конвективной колонки над горящим лесным материалом // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15. № 4. С. 375–382.
6. Долгов А.А., Рейно В.В., Цвык Р.Ш., Андриенко О.С. Спектры излучения горящих лесных материалов // Сб. докладов Всероссийской научной конференции «Дистанционное зондирование земных покровов и атмосферы аэрокосмическими средствами». Муром, 2001. С. 245–248.
7. Криксунов Л.З. Справочник по инфракрасной технике. М.: Сов. радио, 1978. 400 с.

R.Sh. Tsvyk. Flame transparency at burning of forest combustible materials.

The results of experimental investigations of the flame spectral transparency at burning of forest combustible materials (Siberian pine needles) in the region of 0.6–5.5 μm are presented. The height above the burning surface was 10 cm. The conditions of medium ground fire at calm weather were modeled.