

\* \*  
\*

УДК 551.515.3

*М.В. ШЕРСТОБИТОВ, Р.Ш. ЦВЫК*

### **О РАЗЛИЧИИ В ЭМИССИОННЫХ ИК-СПЕКТРАХ ЭТАНОЛА ПРИ СВОБОДНОМ ДИФфуЗИОННОМ ГОРЕНИИ И В РЕЖИМЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОГНЕННОГО СМЕРЧА<sup>1</sup>**

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов горения жидкого топлива в режиме закрученной струи (модель огненного смерча). Были зарегистрированы эмиссионные спектры пламени. В выбранном диапазоне регистрации (2,2–4,8 мкм) отчетливо прослеживаются шесть спектральных интервалов, в которых сосредоточена основная часть излучаемой энергии. Путем использования отношения сумм интенсивностей спектров в окрестностях 6-го и 3-го максимума удалось разделить режимы моделируемого огненного смерча в отличие от свободного диффузионного режима горения топлива.

*Ключевые слова:* огненный смерч, физическое моделирование, эмиссионные спектры пламени.

#### **Введение**

Известны случаи возникновения огненного смерча (ОС) во время обширного лесного пожара [1], пожара на нефтехранилище [2], в периоды военных действий при обширных городских пожарах и т.п. Качественно ОС можно рассматривать как трансформацию относительно широкого очага горения в закрученный столб пламени [2]. ОС приводит к катастрофическому воздействию на окружающую среду вследствие более интенсивного воздействия высокотемпературного потока закрученного пламени.

Изучение ОС в естественных условиях затруднительно по многим причинам, и поэтому исследование этого явления производится в основном путем физического и математического моделирования [11, 12]. В одной из предыдущих работ авторов на эту тему [3] представлены результаты применения оптических методов исследования модельного огненного смерча (МОС). Следует отметить, что в установившемся режиме МОС пламя в нижней части имеет голубой оттенок, высота которого в несколько раз больше, чем при свободном диффузионном режиме сгорания топлива.

В обзорной работе [4] приведен график, полученный японскими авторами Tsuji, Yamaoku в 1967 г., который можно интерпретировать так, что при большом притоке окислителя в область горения в пламени появляется голубой оттенок вместо желтоватого. В нашем случае это обстоятельство обеспечивается, вероятно, закруткой воздуха вокруг неподвижной ёмкости с топливом (см. рис. 1). Упомянутая разница в высоте голубой зоны МОС и свободного диффузионного сгорания пламени послужила причиной исследования спектрального состава указанных режимов горения в среднем ИК-диапазоне. Заметим, что под свободным диффузионным режимом сгорания мы подразумеваем горение топлива без воздействия внешнего закручивающего потока воздуха, так как горение в режиме МОС также является диффузионным.

В работе [5] были получены эмиссионные спектры излучения пламени хвои кедра, однако эти результаты имеют невысокое спектральное разрешение (порядка  $20 \text{ см}^{-1}$ ) и не дают ответа на вопрос об изменении спектра в режиме МОС. Заметим также, что исследования эмиссионных спектров пламени восходят к середине XIX века. Среди множества результатов по исследованию пламени отметим результаты, полученные в первой половине XX века, когда были выявлены основные ИК-интервалы излучения пламени [6] в окрестности 2,8 и 4,4 мкм и приведены некоторые результаты по использованию отношения спектральных интенсивностей в вышеуказанных областях для описания пламени.

#### **1. Цель работы**

В работе решались следующие задачи:

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке ГК № 02.740.11.0674.

1. Получить экспериментальные эмиссионные спектры на различной высоте пламени для режима свободного горения топлива и в режиме МОС.
2. На основе анализа спектров предложить критерий, характеризующий различие в режимах горения.

## 2. Схема установки и методика измерений

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В установке емкость с горючим 2 оставалась неподвижной, а окружающий воздушный поток закручивался вращающейся крыльчаткой. Фактически моделировалась закрутка пламени периферийным сдвиговым (закрученным) потоком [3]. В результате пламя, взаимодействуя с периферийным потоком, закручивалось, образуя смерч в широком диапазоне скоростей вращения. В качестве горючего использовался спирт, его объем во всех реализациях составлял 20 мл.

В качестве регистратора использовался программируемый спектрограф модели MS2001i (Белоруссия) с компенсацией астигматизма. В качестве фотоприемника применялся спектрометрический инфракрасный модуль (СИМ) на основе гибридной фотоприёмной линейки DIMS InSb с 1×384 элементами, размером 18×300 мкм, шагом 25 мкм, диапазон длин волн 1–5 мкм, выходной интерфейс – USB, разрядность АЦП-14, охлаждение жидким азотом (разработчик и изготовитель ИФП СО РАН). Программа управления обеспечивала электронное сканирование, суммирование 10 мгновенных спектров и регистрацию среднего спектра, затем решетка поворачивалась на запрограммированный сдвиг ( $\approx 250$  мкм). Процедура измерений повторялась до конца заданного диапазона.

Для измерений и анализа был выбран спектральный диапазон 2,2–4,8 мкм (решетка 200 штрихов/мм), в котором расположены достаточно сильные полосы (поглощения) излучения основных продуктов горения (паров воды и углекислого газа). Кроме того, выбранный диапазон соответствует максимуму излучения пламени. Максимальные температуры пламени были получены авторами в предыдущих работах и составляли 1000–1300 К. Согласно [7], соответствующие для АЧТ положения максимумов интенсивности в единичном спектральном интервале могут быть найдены по формуле

$$\lambda_{\max} T = 3668 \text{ мкм}\cdot\text{К}. \quad (1)$$

Расчеты для указанных выше температур пламени показывают, что в нашем случае  $\lambda_{\max}$  лежит в диапазоне 2,8–3,7 мкм. В работе [3] получено, что интегральный коэффициент излучения пламени при сжигании спирта в диапазоне 2,5–2,7 мкм составляет  $\varepsilon_1 \approx 0,16$ –0,26. Таким образом, предварительный анализ показал обоснованность в выборе ИК-диапазона для регистрации излучения МОС.

Высота регистрации спектров составляла 0; 5; 10; 20 и 30 см от уровня емкости с топливом до нижнего края щели. Входная щель спектрометра имела вертикальный размер порядка 30 мм и ширину 200 мкм. Суммарный оптический путь от центра емкости составлял порядка 1 м, в том числе до емкости с топливом 30 и 70 см внутри спектрографа. Время регистрации одного спектра – порядка 30 с. Такое продолжительное время обусловлено в основном невысокой скоростью механического способа поворота решетки после электронного сканирования участка спектра порядка 250 мкм. Для получения одного спектра (2,2–4,8 мкм) требовалось порядка 15 последовательных поворотов-«шагов» дифракционной решетки. В режиме МОС высота пламени составляла 60–80 см, и был получен набор спектров горения на всех высотах положения спектрометра. В свободном диффузионном режиме высота пламени достигала лишь 30 см, вследствие чего спектры в этом режиме на этой высоте не регистрировались из-за больших пульсаций языков пламени. Статистическая надежность всех полученных спектров обеспечивалась 40-кратным суммированием с

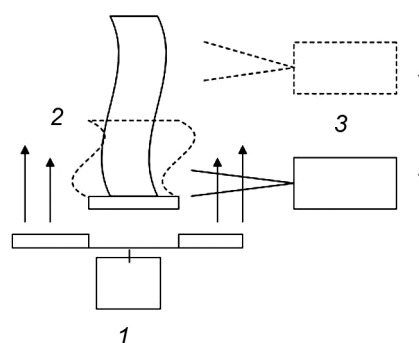


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – электродвигатель с крыльчаткой и системой регулирования частоты вращения; 2 – емкость с топливом и горение в режиме МОС и диффузионном (штриховая линия); 3 – автоматизированный спектрограф. Штриховой линией указано положение спектрографа при перемещении

дальнейшим осреднением для каждой точки спектра в процессе работы прикладной программы спектрометра.

### 3. Обсуждение результатов измерений

В настоящей работе было получено несколько десятков спектров. Характерный спектр излучения пламени и сравнение участка спектра с расчетным спектром пропускания атмосферы с применением информационной системы [10] представлены на рис. 2.

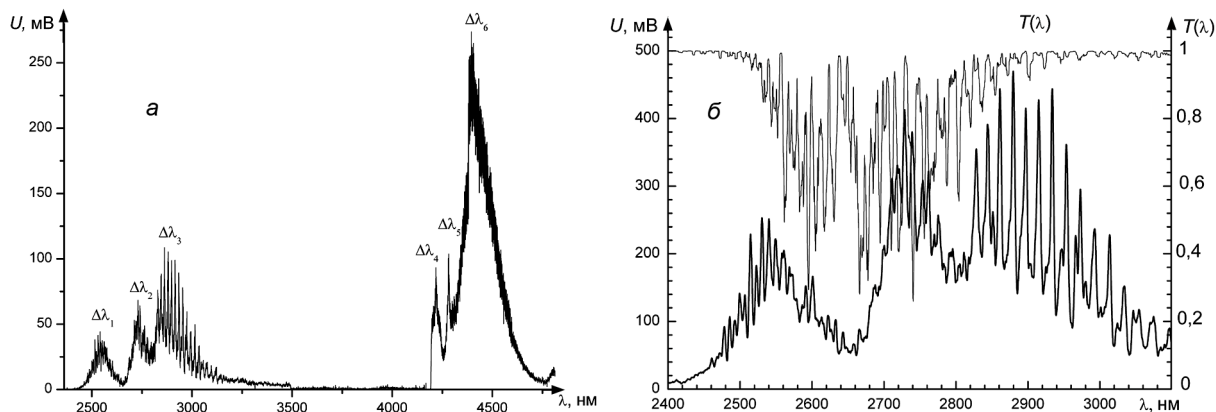
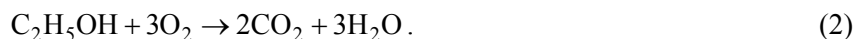


Рис. 2. Характерный спектр излучения топлива в режиме МОС (а), сравнение спектра излучения пламени с расчетным пропусканием атмосферы  $T(\lambda)$  на трассе 1 м (б)

Видно, что в спектре присутствуют шесть максимумов (пики): первые три – «коротковолновые» пики ( $\lambda_1$ – $\lambda_3$ ) и три – «длинноволновые» ( $\lambda_4$ – $\lambda_6$ ). Анализ спектров показал, что в средней части спектра наблюдается широкая зона слабой интенсивности. Ширина этой зоны составляет приблизительно 1 мкм. В зависимости от режима сгорания и условий измерения изменяются лишь амплитуды на различных участках спектра, а его форма сохраняется. Отметим, что форма спектров подобна полученным при сжигании хвои кедра [5] и др. лесных горючих материалов (ЛГМ) [9]. Эти факты подтверждают, что главные излучающие компоненты одинаковы и для ЛГМ, и для этилена, который использовался нами в качестве топлива. Упрощенно, без возможных промежуточных продуктов горения, для качественного описания процесса можно записать химическую реакцию сгорания этилена:



Из многочисленных результатов работ других авторов (например, [6]) и уравнения (2) видно, что основными излучающими молекулами в пламени являются конечные продукты сгорания: вода и углекислый газ. С помощью базы данных [10] были оценены величины спектральных интенсивностей  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Оказалось, что суперпозиция расчетных спектров  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$  [10] хорошо описывает форму наиболее интенсивных участков измеренных спектров в интервалах 3 (см. рис. 2, б) 4, 5 и 6. Интервалы 3 и 6 (рис. 2) были выбраны из следующих соображений: в 3-м интервале преобладает излучение  $\text{H}_2\text{O}$ , в 6-м интервале –  $\text{CO}_2$ . Кроме того, в указанных интервалах спектр имеет наибольшие значения интенсивности, и эти интервалы традиционно используются для описания пламени [6]. На рис. 3 в качестве примера представлен один из спектров МОС в указанных интервалах. Чтобы иметь статистически более надежную величину для дальнейших оценок, было произведено суммирование интенсивностей в окрестностях максимумов интервалов 3 и 6. В интервале 2829,35–2992,75 нм максимума 3 суммирование проводится по десяти характерным максимумам спектральных линий, которые присутствуют во всех реализациях. В интервале 4344,58–4501,18 нм максимума 6 суммирование проводилось аналогичным образом. Количество слагаемых соответствует количеству точек (количеству отсчетов спектрометра) на рис. 3, а – примерно 250 шт.

В дальнейшем будем анализировать суммы значений интенсивности спектров в выбранных интервалах:

$$S_3 = \sum_{i=2829,35 \text{ нм}}^{i=2992,75 \text{ нм}} U(\lambda_i); \quad (3)$$

$$S_6 = \sum_{i=4344,58 \text{ нм}}^{i=4501,18 \text{ нм}} U(\lambda_i). \quad (4)$$

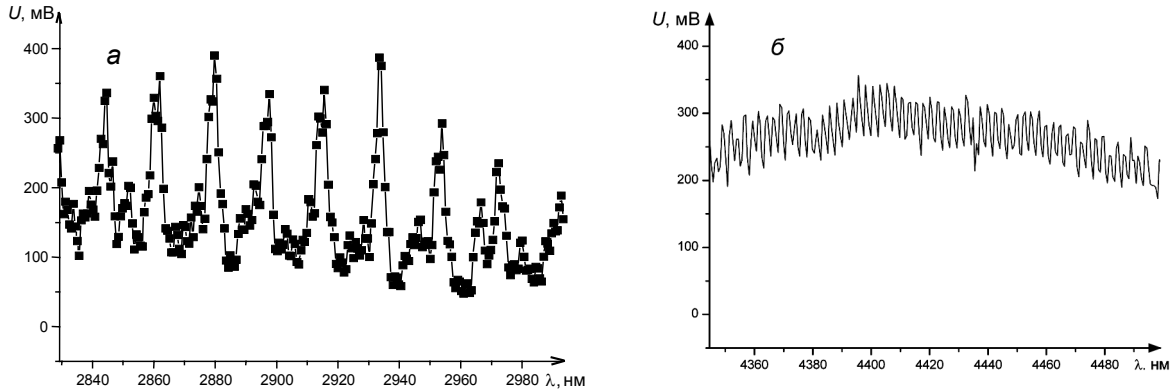


Рис. 3. Вид спектра в окрестности  $\Delta\lambda_3$  (а) и  $\Delta\lambda_6$  (б)

На рис. 4 построены зависимости отношений  $S_6/S_3$  от высоты расположения спектрографа для МОС и свободного диффузионного режимов сгорания топлива. Здесь каждой точке соответствует один экспериментальный спектр. Заметим, что надежные спектры свободного диффузионного режима сгорания вследствие больших пульсаций языков пламени на высоте 20 см удалось зарегистрировать лишь 1 раз, что не позволило определить доверительный интервал в этих условиях. В целом же, аппроксимация полученных значений вышеуказанного отношения позволяет сделать вывод о том, что в режиме МОС наблюдается рост отношения  $S_6/S_3$  с высотой, в то время как при свободном диффузионном режиме наблюдается спадание отношения  $S_6/S_3$ .

На наш взгляд, следует отметить то обстоятельство, что при использовании соотношения  $S_6/S_3$  в качестве критерия, определяющего режим сгорания топлива, мы делаем некоторые допущения. Так, например, предполагаем, что влияние самопоглощения энергии в пламени обоих режимов не оказывает существенного влияния на различия в спектрах. На обоснованность такого допущения указывает работа [13], в которой показано, что при толщине факела менее 20 см справедливо условие приближения оптически «тонкого» слоя.

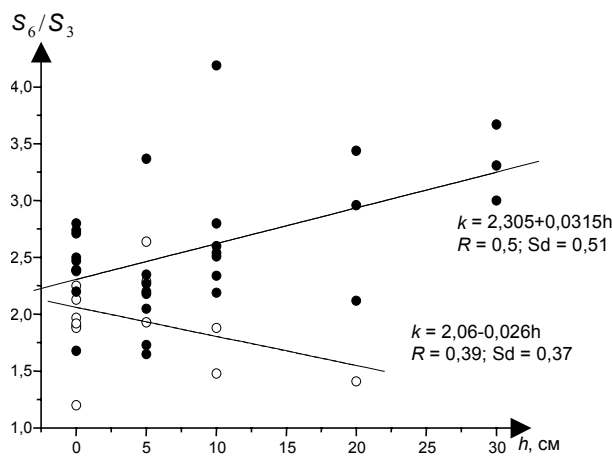


Рис. 4. Зависимость  $S_6/S_3$  в режиме свободного диффузионного горения (полые точки) и МОС (черные точки) от высоты над поверхностью топлива, а также линейная аппроксимация этих данных с коэффициентами корреляции  $r$  и среднеквадратическим отклонением  $Sd$

Так чем же обусловлено различие в поведении отношения  $S_6/S_3$  для этих двух режимов горения? Наиболее правильным объяснением, на наш взгляд, может послужить следующее. В режиме МОС из-за большего притока окислителя увеличивается скорость горения и образуется большее количество конечного продукта сгорания  $CO_2$ , в то время как при свободном диффузионном горении в пламени присутствует относительно большее количество промежуточного продукта горения –  $CO$ . Сравнение спектра излучения этих двух веществ, проведенное с помощью [10], позволяет сделать вывод о том, что излучение  $CO_2$  в 6-м диапазоне на порядки больше излучения  $CO$ , а это и обуславливает разницу в соотношении  $S_6/S_3$ . Эти результаты авторы считают предварительными в том плане, что необходимо провести дополнительные исследования для апробации полученного критерия вначале в различных модификациях лабораторных условий, а затем, возможно, для более крупномасштабных МОС в полевых условиях.

В перспективе, возможно, использование полученного критерия для обнаружения и идентификации ОС в естественной среде.

### Выводы

1. Для оценивания режима сгорания этанола в качестве основных выбраны 3-й и 6-й диапазоны эмиссионного спектра, как наиболее интенсивные и соответствующие разным продуктам горения.

2. С помощью использования того обстоятельства, что соотношение  $S_6/S_3$  растет при увеличении высоты регистрации для МОС режима и остается практически неизменным для свободного диффузионного режима сгорания топлива, в нашем эксперименте удалось разделить режимы сгорания топлива.

3. Во всех полученных спектрах обнаружен интервал с практически нулевой интенсивностью шириной порядка 1 мкм. Данное обстоятельство обуславливает возможность контроля пламени активными оптическими методами в этом интервале.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. King A.R. // Aust. Meteor. Mag. – 1964. – No. 44. – P. 1–9.
2. Наливкин Д.В. Ураганы, бури, смерчи. – М.: Наука, 1969. – 487 с.
3. Гришин А.М., Рейно В.В., Сазанович В.М. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 12. – С. 14–24.
4. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. – М.: Физматлит, 2006. – 352 с.
5. Цвык Р.Ш. // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20. – № 11. – С. 1004–1008.
6. Гейдон А.Г., Вольфгард Х.Г. Пламя, его структура, излучение и температура: пер. с англ. – М.: Металлург, 1959. – 333 с.
7. Гуревич М.М. // УФН. – 1962. – Т. 128. – Вып. 3. – С. 463–470.
8. Гришин А.М., Фильков А.И., Лобода Е.Л. др. // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2011. – № 2(14). – С. 91–102.
9. Meléndez J., Aganda J.M., de Castro A.J., López F. // QIRT. – 2006. – V. 3/2. – P. 183–200.
10. Интернет информационная система «Спектроскопия атмосферных газов», режим доступа <http://spectra.iao.ru>
11. Гришин А.М., Матвиенко О.В., Руди Ю.А. // ИФЖ. – 2009. – Т. 82. – № 5. – С. 902–908.
12. Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В. // Докл. РАН. – 2004. – Т. 395. – № 2. – С. 196–198.
13. Кузнецов В.Р., Сабельников В.А. Турбулентность и горение. – М.: Наука, 1986. – 288 с.

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Россия  
E-mail: [shMike@iao.ru](mailto:shMike@iao.ru)

Поступила в редакцию 15.06.12.