

УДК 535.233+536.46+533.6

Анализ последовательности термограмм при определении частоты вращения факела

М.В. Шерстобитов¹, Р.Ш. Цвык¹, Е.Л. Лобода^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 13.04.2015 г.

В лабораторных условиях исследуется излучение факела при горении этанола в неподвижной емкости, установленной на оси восходящего закрученного воздушного потока. Представлено описание обработки последовательности термограмм закрученного факела. С помощью быстрого преобразования Фурье временных пульсаций тепловизионного сигнала определяется частота вращения факела.

Ключевые слова: тепловизор, вихревое горение, излучение пламени, спектральный анализ сигнала; *thermovisor, vortex combustion, emission from a flame, frequency signal analysis.*

Введение

Вопрос имитации огненного смерча с помощью физической модели огненного смерча (МОС) – факела пламени, образующегося при горении этанола в неподвижной емкости, установленной на оси восходящего закрученного воздушного потока, был подробно освещен в [1]. О применении тепловизора в измерениях частоты вращения такого факела кратко упоминается в [2]. Настоящая статья посвящена подробному описанию этих экспериментов. Актуальность исследований обусловлена открывающейся возможностью дистанционного определения частоты вращения различных факелов в природе и технике.

Оценки применимости тепловизора

Максимальные температуры T упомянутого факела составляли 1000–1300 К. Согласно [3], соответствующие для абсолютно черного тела (АЧТ) значения длин волн максимума спектральной мощности излучения находятся по формуле

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

Следовательно, в этом случае λ_{\max} лежит в диапазоне 2,8–3,7 мкм. В этом «средневолновом» ИК-диапазоне работает большое число тепловизоров, в частности тепловизор JADE J530SB фирмы Cedir. При экспериментах с этим тепловизором установлен высокий коэффициент излучения ($\varepsilon \approx 0,8$) пламени лес-

ных горючих материалов [4], спектр этанола в обсуждаемом диапазоне сходен со спектром лесных горючих материалов [5]. Отметим, что в видимом диапазоне уровень испускаемой энергии меньше на 2–3 порядка, что свидетельствует о преимуществе тепловизионной регистрации факела по сравнению с видеорегистрацией.

Мощность излучения F (Вт) в спектральной полосе $\Delta\lambda$ с поверхности S излучателя, имеющего температуру T , определяется по формуле [6]:

$$F = \int_{\Delta\lambda} \varepsilon(\lambda) [dR(\lambda, T)/d\lambda] S d\lambda. \quad (2)$$

Здесь $R(\lambda, T)$ – спектральная плотность излучения АЧТ (Вт/м³), которая описывается законом Планка:

$$R(\lambda, T) = 2\pi hc^2 \lambda^{-5} (\varepsilon^{hc/kT\lambda} - 1)^{-1}, \quad (3)$$

где h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; c – скорость света.

На интенсивность тепловизионного сигнала от пламени кроме «планковской» составляющей и коэффициента излучения $\varepsilon(\lambda)$ (зависит от спектра излучения газообразных компонентов и концентрации частиц сажи) влияет ослабление оптической трассой и побочные источники излучения.

В условиях нашего лабораторного эксперимента длина трассы составляла примерно 5 м, поэтому дополнительная коррекция коэффициента излучения не проводилась. Источники «паразитной» засветки отсутствовали. Оценим соотношение величин фонового сигнала ($T_1 \approx 300$ К) и пламени ($T_2 \approx 1000$ К). Согласно закону Стефана–Больцмана имеем

$$\frac{F_{1000}}{F_{300}} = \frac{\sigma \varepsilon_{\text{н}} T_2^4}{\sigma \varepsilon_{\text{ф}} T_1^4} = \frac{\sigma \varepsilon_{\text{н}} (1000)^4}{\sigma \varepsilon_{\text{ф}} (300)^4} \approx 123,5, \quad (4)$$

* Михаил Валентинович Шерстобитов (shmike@iao.ru); Рувим Шахнович Цвык (tsvyk@iao.ru); Егор Леонидович Лобода (loboda@mail.tsu.ru).

где σ — постоянная Стефана–Больцмана; $\epsilon_{\text{ш}}$, $\epsilon_{\text{ф}}$ — коэффициенты излучения источника и фона соответственно.

Термограмма представляет собой проекцию факела, но так как пламя является частично прозрачным [7], то высокоинтенсивный участок любого слоя горящего объема отображается более интенсивной областью.

Описание эксперимента

Целью эксперимента являлось определение частоты вращения факела из последовательности термограмм.

Схема тепловизионной съемки процесса горения представлена на рис. 1.

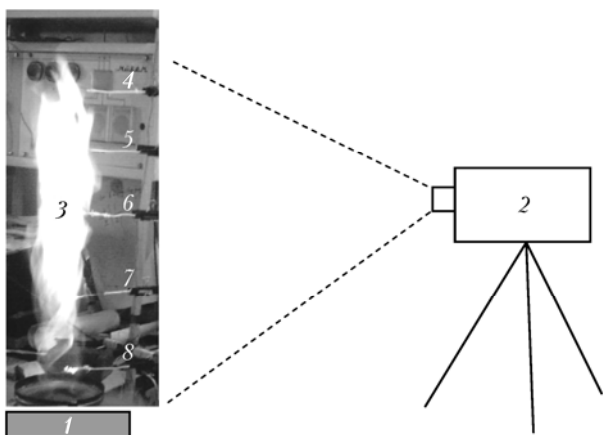


Рис. 1. Электродвигатель с крыльчаткой (1); тепловизор (2); факел (3); «дерево» термопар-реперов (4–8)

Тепловизор JADE J530SB оснащался оптическим фильтром для работы в полосе 2,5–2,7 мкм. Приемник тепловизора представлял собой матрицу 320 × 240 элементов. Для повышения пространственного разрешения тепловизор наклонялся на 90°, тогда вытянутое по вертикали изображение факела отображалось вдоль длинной стороны приемной матрицы, что позволило уменьшить дистанцию съемки до 5 м, при этом поле зрения тепловизора составляло ~ 1 × 1,3 м. Применяли две частоты регистрации термограмм: 50 и 170 Гц.

В качестве геометрических реперов использовали 5 термопар с шагом ~ 11 см по высоте так, что их рабочие спай располагались на вертикальной оси факела, начиная с 3 см от поверхности топлива. Производилась регистрация всего процесса сгорания (~ 1 мин) порции топлива (в начале каждой реализации 20 мл этанола в тонкостенной стальной емкости диаметром 142 мм и высотой бортика 10 мм). Электродвигатель включали сразу после зажигания топлива, что обуславливало наличие переходного режима. Визуальные оценки высоты факела МОС в зависимости от частоты вращения n завихрителя (крыльчатки, имеющей 8 плоских лопаток; диаметр внутренний/внешний — 180/380 мм; угол установки к горизонту — 20°) в установившемся режиме

представлены на рис. 2. Всего было зарегистрировано 6 реализаций горения (табл. 1).

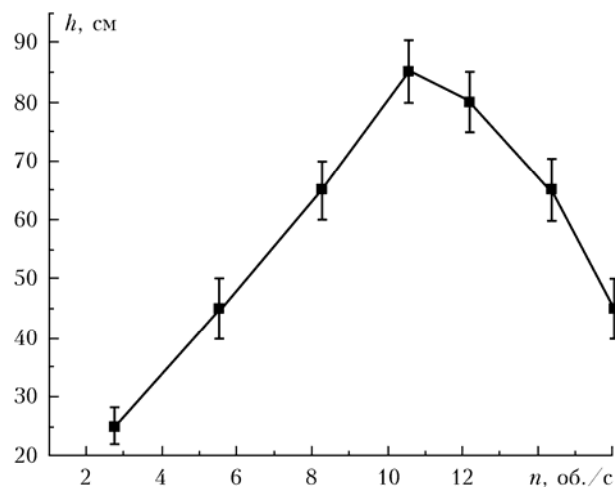


Рис. 2. Высота факела

Таблица 1

Условия эксперимента

Параметр	№ реализации					
	1	2	3	4	5	6
Частота вращения завихрителя, Гц	7,8	9,8	10,9	12,1	13,3	16,7
Частота регистрации термограмм, Гц	50	170	170	170	170	170
Термограммы для расчета частоты вращения, шт.	2800	7000	7300	6470	5590	7600

Анализ результатов

На рис. 3 в качестве иллюстрации представлена термограмма факела реализации № 5 в установившемся режиме. Шкала отображает спектральную яркость в уровнях АЦП (digital level — DL). Сигнал от пламени, при использовании указанной шкалы, линейно пропорционален принятой энергии излучения. В виде равноотстоящих по высоте высокоинтенсивных пятен видны 4 нижних репера. Для определения устойчивого режима горения на термограммах строились сечения факела 1 и 2 на высотах ~ 10 и ~ 20 см от емкости с топливом. Высота расположения верхнего сечения 2 выбиралась так, чтобы в случае невозмущенного диффузионного горения средняя интенсивность в этом сечении не превышала соответствующие значения в нижнем 1. В противном случае мы регистрировали зарождение торнадобного горения (МОС). Затем анализировались временные графики значений средней интенсивности в этих сечениях. Пример такой временной последовательности для реализации № 5 приведен на рис. 4, где по горизонтальной оси отложен номер термограммы N , а по вертикальной — DL.

Для каждой реализации определялся интервал устойчивого горения, а соответствующая последовательность термограмм использовалась для расчетов Фурье-спектров. С ростом частоты закрутки пламени в реализациях № 1–5 продолжительность устойчивого



Рис. 3. Термограмма факела при закрутке 13,3 Гц

чивого режима горения уменьшается, достигая минимального значения в реализации № 5. При дальнейшем повышении частоты закрутки пламени (ре-

лизация № 6) происходят увеличение длительности устойчивого режима горения, уширение и уменьшение высоты факела (см. рис. 2).

Для определения частоты вращения факела проводился численный эксперимент – на термограмме выделялась область из нескольких пикселей. В дальнейшем с помощью готового пакета программ эта область «проецировалась» на всю последовательность термограмм устойчивого режима горения. Затем для последующего Фурье-преобразования рассчитывались временные последовательности на основе среднего, максимального, минимального значений тепловизионного сигнала в упомянутой области. Оказалось, что наилучший результат – наибольшая амплитуда максимума, соответствующего частоте вращения завихрителя в Фурье-спектре, достигается, когда область представляет собой лишь один пиксель в приосевой области факела.

По мере увеличения числа пикселей в выделяемой области на термограмме особенность в спектре в виде пика на частоте закрутки пламени пропадает. Ввиду того что сложно было проанализировать наличие других значимых частот, кроме частоты основного максимума, для анализа спектров применялось осреднение. В условиях нашего эксперимента оптимальным оказалось осреднение по 20 значениям, когда основные максимумы еще сохранялись, а «фоновые» подавлялись (рис. 5).

Чтобы подтвердить соответствие основного максимума частоте вращения факела, использовалось то

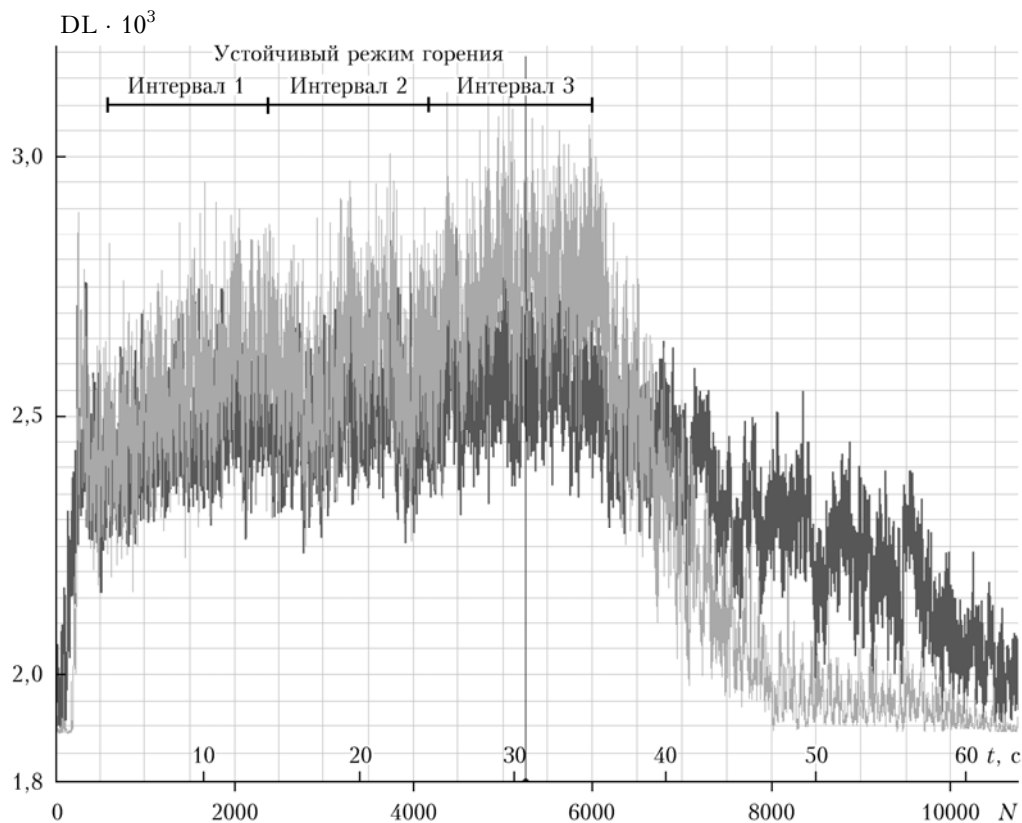


Рис. 4. Зависимость средних интенсивностей в сечениях факела (1 – черный спектр, 2 – серый); схема деления устойчивого режима

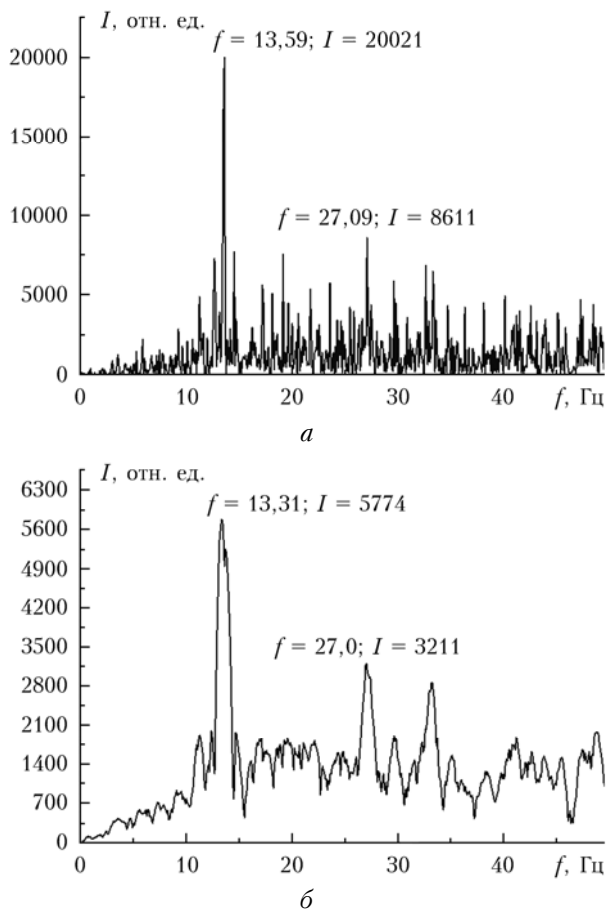


Рис. 5. Исходный спектр (а) и осредненный по 20 значениям (б). Для основных максимумов приведены значения частоты f и интенсивности I

обстоятельство, что частота вращения завихрителя незначительно (на 1–2%) возрастала за время реализации. Следовательно, и в спектрах частота максимума должна была увеличиваться на сопоставимую величину. Для проверки этой гипотезы на термограмме в точках приосевой области факела на пяти высотах, соответственно высотам расположения термопар-реперов, выбиралось по одному пикселю. Положение этих пикселей фиксировалось для всей последова-

тельности. В каждой реализации определялись пять временных последовательностей пульсации тепловизионного сигнала соответственно выбранным пикселям, а затем время устойчивого горения было разбито на три равных интервала (см. рис. 4). В каждом интервале в выбранных пяти приосевых пикселях рассчитывался Фурье-спектр. Всего было получено 90 спектров (по 15 для каждой реализации – 5 высот \times 3 интервала). Частота максимума в 1-м интервале (f_1) и ее изменение для 2-го (Δf_2) и 3-го (Δf_3) интервалов относительно 1-го интервала представлено в табл. 2.

Анализ данных табл. 2 показывает, что реализация № 1 «выпадает» из-за низкой частоты регистрации термограмм (50 Гц). Фурье-спектры, рассчитанные для этой реализации, получились «расходящимися», в отличие от всех спектров для частоты регистрации 170 Гц. Основной максимум при частоте регистрации 50 Гц существенно хуже выделяется среди «фоновых» значений интенсивности в отличие от всех реализаций с частотой регистрации 170 Гц. Таким образом, частота регистрации термограмм 50 Гц недостаточна для определения частоты вращения факела. В реализациях № 2–6 в 20 случаях из 25 наблюдается последовательный сдвиг частоты спектрального максимума в высокочастотную область, что подтверждает соответствие спектрального максимума частоте вращения факела. В реализациях № 5 и 6 отсутствие в трех случаях последовательного увеличения частоты спектрального максимума на верхних реперах, по-видимому, обусловлено началом разрушения структуры огненного вихря. По одному случаю несоответствия во 2-й и 4-й реализациях интерпретировать не удалось.

Везде, кроме реализации № 5 (промах в измерении частоты вращения завихрителя), частота спектрального максимума ниже частоты вращения завихрителя. Это связано с влиянием вязкости воздуха.

Кроме основного максимума наблюдаются максимумы с кратной частотой, но меньшей интенсивности (рис. 5, б). Это, возможно, объясняется следующим образом.

1. Из анализа термограмм видно, что лишь в течение незначительного промежутка времени горящий объем представляет собой достаточно однородную структуру. Большую часть времени в структуре

Таблица 2

Частота основного спектрального максимума 1-го интервала и ее изменение во 2-м и 3-м интервалах

№ реализации	Высота репера, см				
	3	14	25	36	47
	f_1 , Гц; Δf_2 , Δf_3 , %				
1	Б.м.	Б.м.	6,99; +3,0; +5,6	6,99; +2,3; +4,6	6,99; Б.м.; +9,2*
2	9,13; +1,6; +3,3	9,13; +2,4; +3,3	Б.м.	8,57; +7,5; +10,0	9,13; +0,1; +3,3
3	10,20; +0,7; +2,0	10,20; +0,7; +2,0	10,20; +0,7; +2,0	9,49; +8,2; +9,6	10,26; +0,1; +1,4
4	11,38; +0,8; +2,5	11,38; +0,8; +2,5	11,46; +0,1; +1,8	12,57; –8,8; –7,2*	11,06; +3,7; +4,8
5	13,59; +0,7; +1,2	13,59; +0,1; +1,3	13,03; +4,4; +5,6	13,59; +0,1; +1,3	12,08; +14,1; +13,3*
6	15,63; +0,5; +0,8	15,63; +0,5; +0,8	15,70; +0,1; +0,4	15,77; –0,4; –0,1*	15,63; +0,5; –3,8*

Примечание. Б.м. – без максимума (основной максимум в спектре не проявляется); звездочка – нет последовательного увеличения частоты основного спектрального максимума.

факела существуют ячейки повышенной яркости на фоне остального менее интенсивно светящегося пламени. На термограммах видно одновременно несколько ячеек, движущихся по винтовым траекториям вверх. Такая пятнистая структура пламени обуславливает наличие в спектре сигнала максимальной частоты, связанной со скоростью вращения завихрителя, и более высоких частот, вызванных движением мелких ячеек. Причем кратность этих вторичных максимумов частоте позволяет предположить, что происходит дробление крупных ячеек на мелкие, размер которых уменьшается по закону целых чисел. Подобный механизм отмечен в [8].

2. Еще один механизм появления максимума двукратной частоты возможен потому, что излучение яркой ячейки, находящейся на дальней стороне факела, проходит сквозь пламя, но так как в этом случае «пятно» имеет противоположную направленность движения, то возникает кратное увеличение частоты пульсации тепловизионного сигнала.

Заключение

1. Разработан критерий для определения возникновения торнадоподобного горения, основанный на сравнении средних интенсивностей на двух высотах термограмм.

2. Установлено соответствие частоты спектрального максимума последовательности термограмм частоте вращения завихрителя, что позволяет дистанционно определять частоту вращения факела.

3. В 80% случаев расчета спектра обнаружен сдвиг спектрального максимума, обусловленный дрейфом частоты вращения электродвигателя завихрителя, что подтверждает соответствие частоты спектрального максимума частоте вращения факела.

4. Метод измерения спектров на $1/3$ – $1/2$ высоты факела может быть применен для разработки устройства контроля скорости вращения вихревых пламен.

В качестве дальнейшего направления исследований в этой области интерес вызывает вопрос оценки развития турбулентности пламени с высотой, оценки изменения числа Рейнольдса с высотой, а также верификация полученных результатов в масштабе полевого эксперимента.

Авторы выражают признательность Н.Г. Мельникову за подготовку экспериментальной установки.

1. Гришин А.М., Рейно В.В., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш., Шерстобитов М.В. Некоторые итоги экспериментальных исследований огненных смерчей // Изв. вузов. Физ. 2011. Т. 54, № 12. С. 14–23.
2. Шерстобитов М.В., Лобода Е.Л., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш. Влияние скорости вращения огненного смерча на параметры зондирующего пучка и собственного излучения // Изв. вузов. Физ. 2012. Т. 55, № 9–2. С. 198–200.
3. Гуревич М.М. О спектральном распределении мощности излучения // Успехи физ. наук. 1962. Т. 128, вып. 3. С. 463–470.
4. Лобода Е.Л., Рейно В.В. Влияние коэффициента излучения пламени на измерение температур ИК-методами при горении лесных и степных горючих материалов и различном влагосодержании. Частотный анализ изменения температуры в пламени // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 11. С. 1002–1006.
5. Шерстобитов М.В., Цвык Р.Ш. О различии в эмиссионных ИК-спектрах этанола при свободном диффузионном горении и в режиме воздействия воздушного потока при моделировании огненного смерча // Изв. вузов. Физ. 2013. Т. 56, № 1. С. 90–94.
6. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. Основы. Техника. Применение. М.: Мир, 1988. 420 с.
7. Pastor E., Rigueiro A., Zárate L., Giménez A., Arnaldos J., Planas E. Experimental methodology for characterizing flame emissivity of small scale forest fires using infrared thermography techniques // IV Int. Conf. on Forest Fire Research 2002 Wildland Fire Safety Summit. Coimbra, 2002. P. 1–11.
8. Соболев В.С. Лазерная доплеровская анемометрия и турбулентность // Труды X Юбилейной Междунар. конф. «Оптические методы исследования потоков». М., 23–26 июня 2009. М: Изд. дом МЭИ, 2009. С. 14–19.

M.V. Sherstobitov, R.Sh. Tsvyk, E.L. Loboda. Processing sequence of thermograms in determining rotation frequency of the torch.

We explored fire torch's radiation in laboratory conditions. Fire torch was burning from a tank, which was fixed at the axis of uprising flow of air. Ethanol was used as a fuel. The description of processing of a thermogram sequence of the twisted torch is presented. The rotation frequency was determined by FFT conversion of time pulsation of thermovision signal.