

АНАЛИЗ ТЕЧЕНИЯ В ДИФФУЗИОННОМ ПЛАМЕНИ ПО ДАННЫМ ИК ТЕРМОГРАФИИ

Лобода Е.Л.^{1,2}, Матвиенко О.В.¹, Агафонцев М.В.^{1,2}, Рейно В.В.²

¹ Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

² Институт оптики атмосферы СО РАН им. В.Е. Зуева, г. Томск, Россия

E-mail: loboda@mail.tsu.ru, matvolegv@mail.ru, kim75mva@gmail.com, reyno@iao.ru

Аннотация: В работе представлены результаты экспериментального исследования перемещения газообразных продуктов в пламени, образующемся при горении некоторых жидких углеводородов. Произведен анализ структуры течения в пламени, образующемся при горении ряда жидких углеводородных топлив. Предложено выделять 7 участков пламени с характерными значениями турбулентного числа Рейнольдса, где реализуются различные режимы течения.

1. Введение

Применение методов инфракрасной термографии благодаря современным техническим возможностям и высокой скорости регистрации является перспективным направлением исследования структуры турбулентного пламени и получило достаточно широкое применение [1, 2]. Необходимо отметить, что применение методов ИК термографии для исследования процессов горения сопряжено с рядом фундаментальных и методических трудностей, таких как анализ спектров излучения и оптических характеристик пламени, выбор спектрального интервала исследований и др. [3, 4].

Следует отметить, что несмотря на значительные многолетние исследования турбулентного горения [5–8], которые в мире ведутся с середины XX века, говорить о завершенности исследований этого явления не возможно. Остается открытым вопрос взаимосвязи и подобия пульсаций гидродинамических и термодинамических параметров, который формулируется на уровне гипотезы [9].

2. Методы исследования

Термографическое изображение (рисунок 1а) получено по методике, описанной в [4], с применением ИК-камеры JADE J530SB, узкополосного оптического фильтра с полосой пропускания 2.5–2.7 мкм и скоростью съемки 170 кадров/сек. Выбор узкополосного фильтра основан на анализе спектров излучения пламени [3]. Мгновенное трассерное PIV-изображение (рисунок 1с) получено при помощи Polis PIV system [10].

Анализируя термографическое и PIV изображения пламени рисунке 1, образующегося при горении дизельного топлива, можно сделать вывод, что на разной высоте пламени реализуются разные режимы течения, что должно отражаться в изменении числа Рейнольдса. Анализ пульсаций температуры в пламени говорит о том, что амплитуда пульсаций

температуры напрямую зависит от рассматриваемого участка пламени. Форма и размеры зон температурных неоднородностей на мгновенных термограммах пламени, а также вид PIV-изображений позволяют сделать вывод, что на начальном участке пламени от поверхности жидкого топлива наблюдается течение близкое по своему виду к ламинарному, в котором в дальнейшем при перемешивания с окислителем из окружающей атмосферы и протекания окислительных реакций наблюдается образование вихреобразных структур, которые расширяются и в дальнейшем распадаются.

3. Результаты

Анализируя вид термограмм и PIV-изображений факел пламени можно разделить условно на 7 зон с разными значениями Re_t (рисунок 1а). Характерная частота пульсаций температуры в пламени f определялась для выбранного участка пламени по методу, описанному в [4]. Используя

соотношение для расчета числа Рейнольдса $Re_t = \frac{\rho v^2}{\mu f} \frac{\langle T'T' \rangle}{T^2}$ (где ρ – плотность газа, имеющего температуру T , кг/м³; v – скорость в потоке газа, м/с; μ – коэффициент динамической вязкости газа, имеющего температуру T , Па*с; f – характерная частота пульсации температуры в пламени, с⁻¹; $\langle T'T' \rangle$ – квадрат пульсации температуры в факеле пламени, К²; T – температура в факеле пламени, К), полученное на основании работ [11 – 15], были рассчитаны соответствующие значения Re_t для различных областей факела пламени.

На рисунке 1 представлено деление факела пламени на области с разными значениями Re_t для дизельного топлива.

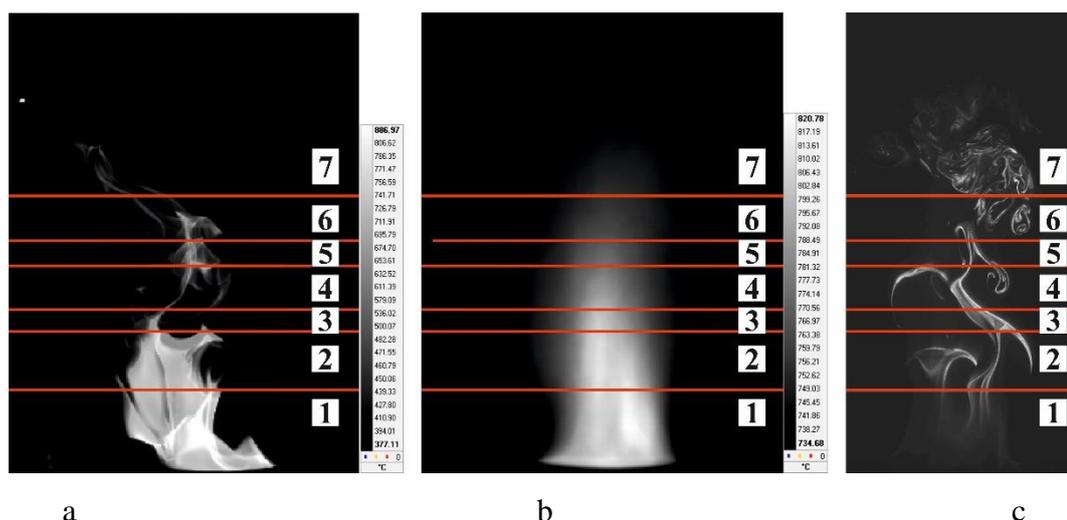


Рисунок 1 – Условное разделение факела пламени, образующегося при горении дизельного топлива, на зоны с разными значениями Re_t

В таблице 1 представлены диапазоны изменения Re_t для разных участков пламени при горении дизельного топлива, а на рисунке 2 приведен вертикальный профиль изменения Re_t , приведенный в безразмерных координатах, где h – текущее значение вертикальной координаты, H – максимальное значение вертикальной координаты факела пламени.

Таблица 1 – Диапазоны изменения Re_t в пламени

Вид топлива	Диапазон изменения Re_t						
	Область 1	Область 2	Область 3	Область 4	Область 5	Область 6	Область 7
Дизельное топливо	2060 – 2114	3509 – 3665	2717 – 2756	3175 – 3248	3068 – 3115	2413 – 2455	1798 – 1836

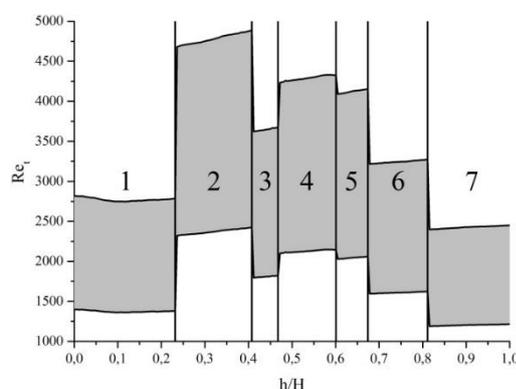


Рисунок 2 – Распределение турбулентного числа Рейнольдса по центральной оси факела пламени, образующимся при горении дизельного топлива

Исходя из полученных значений Re_t и наблюдаемых термографических и PIV-изображений можно констатировать, что:

Область 1 – область, где присутствует квазиламинарное течение с искривленными линиями тока, а подъем горючей смеси обусловлен силой Архимеда ($h/H=0 - 0,232$);

Область 2 – область, где происходит первичное смешение с окислителем из внешней среды, характеризуемая зарождением турбулентных структур ($h/H=0,232 - 0,408$);

Область 3 – область, где происходит основное горение смеси при достижении стехиометрического перемешивания с ростом турбулизации ($h/H=0,408 - 0,468$);

Область 4 – аналогично области 5, где по мере протекания химических реакций происходит увеличение размеров турбулентных структур ($h/H=0,468 - 0,601$);

Область 5 – догорание смеси в виде последних стадий многостадийных окислительных реакций (доокисление CO и др. компонент) ($h/H=0,601 - 0,674$);

Область 6 – снижение температуры продуктов горения, связанное с уменьшением скорости тепловыделения. В результате уменьшения скорости тепловыделения ослабляется генерация турбулентности, сопровождающаяся началом диссипативных процессов ($h/H=0,674 - 0,811$);

Область 7 – область, где происходит диссипация вихревых структур, снижение температуры и торможение потока продуктов горения ($h/H=0,811 - 1,0$).

4. Вывод

В результате проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. ИК-термография позволяет получать детализированную тепловую структуру турбулентных диффузионных пламен, которая является тепловым отражением турбулентных процессов в гидродинамической структуре пламени.

2. Установлено, что на различных участках пламени при диффузионном горении рассмотренных жидких топлив реализуются различные механизмы и режимы течения, а пламя можно условно разделить на 7 характерных участков.

3. Предложено выражение для расчета турбулентного числа Рейнольдса Re_t в пламени, которое включает в себя амплитуды и частоты пульсации температуры, измеренные с применением методов ИК термографии.

Литература

1. Qian C., Saito K., Measurements of Pool-Fire Temperature Using IR Technique, Combustion Institute/Central and Western States (USA) and Combustion Institute/Mexican National Section and American Flame Research Committee, Combustion Fundamentals and Applications, Joint Technical Meeting, in: J.P. Gore (Ed.), Proceedings, San Antonio, TX, April 23–26. 1995. P. 81–86.
2. Rinieri F., Balbi J.-H., Santoni P.-A. On the use of an infra-red camera for the measurement of temperature in fires of vegetative fuels // QIRT. 2006. P. 1–10. DOI: 10.21611/qirt.2006.011.
3. Loboda E.L., Reyno V.V., Agafontsev M.V. Choice of a spectral range for measuring temperature fields in a flame and recording high-temperature objects screened by the flame using IR diagnostic methods // Russ. Phys. J. 2015. Vol. 2. P. 278–282. DOI: 10.1007/s11182-015-0493-x.
4. Loboda E.L., Reyno V.V., Vavilov V.P. The use of infrared thermography to study the optical characteristics of flames from burning vegetation // Infrared Phys. Technol. 2014. Vol. 67. P. 566–573. DOI: 10.1016/j.infrared.2014.09.041.
5. Kairuki J., Dawson J.R., Mastorakos E. Measurements in turbulent premixed bluff body flames close to blow-off // Combustion and Flame. 2012. Vol. 159. P. 2589–2607. DOI:10.1016/j.combustflame.2012.01.005.
6. Damköhler G. Der Einfluss der Turbulenz auf die Flammengeschwindigkeit in Gasgemischen // Zs. Elektrochem. 1940. V. 46. 601 p.
7. Libby P., Williams F.A. Turbulent Reacting Flows // Academic Press Inc. 1994. P. 1–43.
8. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., Dulin V.M., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Steam-enhanced regime for liquid hydrocarbons combustion: velocity distribution in the burner flame // Thermophysics and Aeromechanics. 2014. Vol. 21. Iss.3. P.393–396.
9. Piquet J. Principles of Turbulent Flow Modeling // Turbulent Flows. Springer, Berlin, Heidelberg. 1999. P. 23–141. DOI: 10.1007/978-3-662-03559-7_2.
10. Loboda E.L., Anufriev I.S., Agafontsev M.V., Kopyev E.P., Shadrin E.Y., Reyno V.V., Vavilov V.P., Lutsenko A.V. Evaluating characteristics of turbulent flames by using IR thermography and PIV // Infrared Physics and Technology. 2018. Vol. 92. P. 240–243. DOI: 10.1016/j.infrared.2018.06.006.
11. Menter F.R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows // AIAA Paper. 1993. N93-2906. 21 p.
12. Cebeci T., Bradshaw P. Momentum Transfer in Boundary Layers // McGraw-Hill, New York. 1977. 391 p.

13. Volchkov E.P., Terekhov V.I., Terekhov V.V. Flow structure and heat and mass transfer in boundary layers with injection of chemically reacting substances (Review) // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2004. V. 40. № 1. P. 1–16.
14. Харша П. Модели переноса кинетической энергии // *Турбулентность: принципы и применение*. М.:Мир. 1980. С .207–261.