

6. Телешевский В. И., Соколов В. А. Анализ объемных геометрических погрешностей в многокоординатных измерительных и технологических системах на основе лазерных измерений // Измерительная техника. 2013. № 12. С. 19—23.

7. Гришин С. Г., Телешевский В. И. Анализ фазовых шумов в гетеродинной интерферометрии с акустооптическим преобразованием частоты света // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 17—21.

8. Латонов И. В., Шулепов А. В. Способ бесконтактной оценки шероховатости поверхности по ее цифровому изображению, формируемому оптической системой измерительного микроскопа // Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2013. № 1. С. 141—145.

Дата принятия 15.04.2015 г.

536.46; 536.521.1

Визуализация свободных концентрированных огненных вихрей с помощью термографа

А. Ю. ВАРАКСИН¹, А. В. ГЛУБОКОВ², М. В. ПРОТАСОВ¹, М. Э. РОМАШ¹,
В. Н. КОПЕЙЦЕВ¹, Е. В. РОМАШ²

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия,

² Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия, e-mail: al-glubokov@yandex.ru

Разработана экспериментальная установка для визуализации огненных вихрей. Проведен анализ нестационарного пламени, получаемого в результате сжигания твердого горючего. С помощью инфракрасного термографа идентифицированы нестационарные огненные вихревые структуры. Предложен алгоритм фиксации огненного вихря по термограмме и определения его геометрических и температурных характеристик.

Ключевые слова: огненные вихри, концентрированные вихри, инфракрасная термография.

The experimental installation for visualization of wall-free fire vortices has been developed. The analysis of the non-stationary fire generated by burning of solid fuel has been carried out. An identification of the non-stationary fire vortex structures occurrence by means of infrared thermograph was done. An algorithm of the fire vortex fixation by thermogram and its geometry/temperature parameters determination has been suggested.

Key words: fire vortices, concentrated vortices, infrared thermography.

Вихревое движение является одной из основных форм движения сплошных сред. В многообразии вихревых потоков отчетливо выделяются концентрированные вихри, широко распространенные в природе (воздушные, водяные и огненные смерчи, пыльные «дьяволы») и применяемые в различных технических устройствах (вихревых горелках, топочных камерах, центробежных форсунках, циклонных сепараторах, вихревых трубах, различных турбулизаторах) [1, 2].

Для формирования ограниченных стенками вихревых течений обычно используют тангенциальный сопловой подвод среды, различные механические закручивающие устройства [3, 4], интенсивное вращение корпусных элементов каналов. Генерацию свободных (не ограниченных стенками) концентрированных вихрей, в том числе и огненных, осуществляют с использованием вентиляторов и (или) путем вращения основания экспериментальной установки [5]. Получаемые указанными способами стационарные вихревые потоки удобны для детального экспериментального изучения, однако их характеристики могут значительно отличаться от параметров реальных нестационарных вихревых структур, например, наблюдаемых в земной атмосфере.

Изучение свободных нестационарных концентрированных вихрей осложнено рядом причин: спонтанностью образования, пространственно-временной нестабильностью, невозможностью управления характеристиками и т. д. Из-за отмеченных трудностей в настоящее время практически отсутствуют экспериментальные работы, где получены результаты по устойчивости и динамике свободных нестационар-

ных концентрированных вихрей, приемлемые для верификации математических моделей. Исключением являются работы по изучению возможностей генерации и управления поведением свободных нестационарных воздушных вихрей [6—9].

Одна из основных задач при исследовании причин возникновения и поведения свободных нестационарных воздушных вихрей — анализ распределения температурных полей. Применение контактных методов невозможно из-за внесения возмущений в структуру течения потоков, что приводит к разрушению вихрей [10]. Использование бесконтактных методов, в частности инфракрасной (ИК) термографии, которые нашли широкое применение в различных областях [11, 12], затруднено из-за малого размера частиц, используемых для визуализации вихрей.

В то же время процессы, аналогичные воздушным вихрям, возникают и в пламени. С одной стороны, исследование пламени имеет специфику, сильно влияющую на результаты, с другой — при достаточной степени визуализации, в том числе и для средств измерений, позволяет определить параметры концентрированных огненных вихрей. Результаты исследований характера изменений температурных полей в зоне появления огненных вихрей и разработанные алгоритмы их идентификации можно применять для решения задач, связанных с воздушными вихревыми потоками. Цель настоящей работы — исследование поведения свободного нестационарного пламени, визуализация возникающих огненных вихрей и оценка их геометрических и температурных параметров с помощью ИК-термографа.

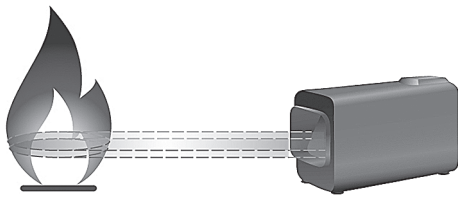


Рис. 1. Зона пламени, излучение которой воспринимается термографом

При использовании ИК-термографа в приемник попадает излучение от участков сечения пламени различной температуры (рис. 1) [13]. Проводится измерение средней радиационной температуры T_p , термодинамическое значение которой можно определить по формуле

$$T = T_p / \sqrt[4]{\varepsilon_T}, \quad (1)$$

где ε_T — коэффициент излучения.

При известных распределении температуры стационарного пламени по наблюдаемому сечению и геометрических размерах (диаметре) пламени можно вычислить радиационную температуру в каждой точке по результатам измерений ИК-термографом. Коэффициент излучения определяют при сопоставлении результатов измерений, полученных термографом и термпарой, что позволяет получить термодинамическую температуру. Коэффициент излучения является стабильным для однотипных условий горения и вида горючего и может быть использован при анализе нестационарного пламени.

В условиях нестационарного пламени информация о распределении плотности пламени внутри наблюдаемого сечения отсутствует. Кроме того, она практически не может быть получена с помощью термпар из-за их достаточно высокой инерционности. Показание ИК-термографа для конкретного сечения можно рассматривать как результат, зависящий от размера (диаметра), распределения плотности внутри сечения и максимальной температуры пламени. Определение характера изменений указанных параметров даст возможность идентифицировать процессы, происходящие в нестационарном пламени.

Постановка задачи. Для генерации нестационарного пламени использовали экспериментальную установку, представляющую стол из алюминия марки Д16АМ диаметром 1100 мм и толщиной 1,5 мм. Верхняя (подстилающая) поверхность алюминиевого листа зачернена жаростойкой краской. В центральной части подстилающей поверхности размещали таблетки уротропина (гексаметилентетрамин $C_6H_{12}N_4$) и под-

жигали их. Масса каждой таблетки диаметром 40 мм составляет 21 г, теплота сгорания уротропина 30 МДж/кг. Фиксацию параметров процесса горения и генерируемых вихревых структур проводили с использованием видеокамеры и ИК-термографа (модель ИРТИС-2000 СН).

Принцип работы ИК-термографа основан на сканировании температурного излучения оптико-механическим сканером с одноэлементным высокочувствительным ИК-приемником. Для повышения чувствительности прибора приемник охлаждают жидким азотом ($T = 77$ К) до малых температур. Это позволяет достичь чувствительности $0,05$ °С при погрешности измерения ± 1 %. Использование сканирующей системы снижает временное разрешение (минимальное время сканирования кадра $0,5$ с) по сравнению с матричными, однако при этом можно получить достоверную информацию по всей области сканирования. Режим съемки одной строкой (разрешение 640×1 пикселей, частота до 500 Гц) позволяет фиксировать и быстроменяющиеся процессы.

Предыдущие исследования показали, что время жизни подавляющего большинства генерируемых вихрей составляло 1 — 5 с [14], поэтому временного разрешения термографа достаточно для фиксации огненных вихрей. Диапазон измерений ИК-термографа $-20 \dots +1700$ °С. Рабочий спектральный диапазон находится в среднем ИК-диапазоне $3,0$ — $5,0$ мкм. Использование данного диапазона целесообразно в связи с тем, что в нем находятся максимумы, обусловленные излучением горячих продуктов горения (паров воды, CO_2 , CO и др.). Выбор в качестве средства измерений ИК-термографа ИРТИС-2000 СН обоснован широким диапазоном измерений температур, который позволяет использовать его при анализе и огненных, и воздушных вихрей без потери чувствительности. Во время эксперимента проводили параллельную запись термограммы и видеоизображения.

Результаты. При сжигании горючего на экспериментальной установке при относительной стабилизации пламени наблюдается осесимметричная термограмма (рис. 2, а). При этом высота пламени изменяется слабо и зависит от времени, прошедшего с момента поджога. Данную стадию горения с определенной степенью допущения можно считать квазистационарным процессом, для которого можно определить распределение температурных полей. В начальной стадии зарождения вихря на термограмме наблюдается заметное снижение столба пламени и изменение формы (рис. 2, б). Это объясняется тем, что вихри зарождаются, как правило, в боковых зонах пламени. Происходит изменение диаметра пламени в различных сечениях и перераспределение его плотности, что приводит к изменению температуры, отображаемой термографом. Затем появляется всплеск в направлении распространения вихря. Высота столба пламени превышает высоту стационарного пламени в $1,5$ — 2 раза (рис. 2, в, г). Направление распространения пламени во многих случаях не совпадает с центральной осью. Наблюдают осесимметричные участки на термограмме, что подтверждает неравномерность распределения температуры и возникновения вихревых структур. Сопоставление результатов, полученных термографом, и видеоизображений дает возможность определить характер изменений, происходящих на термограмме, при возникновении огненных вихрей.

Разработан алгоритм фиксации огненного вихря на основе анализа последовательно записанных термограмм. Анализируемая часть термограммы разбивается

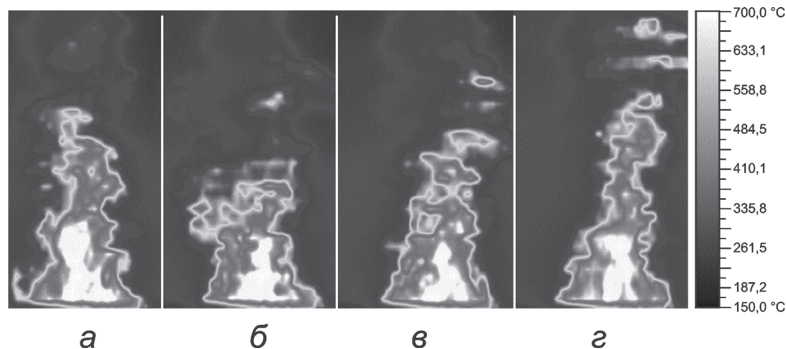


Рис. 2. Изменение термограммы при возникновении огненного вихря: относительная стабилизация пламени (а); начало зарождения вихря (б); резкий рост высоты пламени (в); полностью развитый вихрь (г)

на одинаковые области. Программное обеспечение термографа позволяет построить зависимость от времени максимальной и (или) средней температуры в конкретной области. Температура в каждой области для случая стабильного пламени известна и определялась как с помощью термографа, так и с помощью хромель-алюмелевой термопары. Зависимость изменения максимальной температуры от времени в трех областях, расположенных на высоте 700; 900; 1100 мм от поверхности стола и смещенных относительно оси пламени на 150 мм, приведена на рис. 3.

Наблюдается кратковременное резкое повышение температуры в рассматриваемых областях, при этом длительность составляет 1—5 с. Сопоставление значений максимальных температур для всех областей, расположенных над пламенем, позволяет идентифицировать огненный вихрь и определить ряд его геометрических и температурных характеристик. Данные результаты расшифровки термограмм полностью соответствуют визуальным наблюдениям огненных вихрей.

Следует отметить, что для автоматизации процесса идентификации вихрей по анализу термограмм определения максимальной температуры в области недостаточно. Необходимо оценивать и среднее значение температуры, чтобы исключить влияние точечных всплесков на термограмме, не связанных с вихрями. Для определения среднего значения желательнее применять методы рекуррентного робастного оценивания, которые позволяют повысить устойчивость оценок [15].

Покадровый анализ термограмм позволил получить информацию о следующих параметрах процесса генерации огненных вихрей и их интегральных характеристиках: временной диапазон образования и время жизни вихревых структур; область возникновения и количество наблюдаемых вихрей за один эксперимент; высота и диаметр вихрей.

Заключение. Предложено использование ИК-термографа для визуализации возникающих нестационарных огненных вихревых структур. Термограммы, получаемые ИК-термографом, визуализируют вихревую структуру, возникающую на пламени. Разработан алгоритм обработки последовательно записанных термограмм, основанный на анализе максимальной и средней температур в отдельных областях термограммы, который позволяет определять геометрические характеристики вихревых структур (высоту и диаметр), область возникновения и время их жизни. Сделан вывод о целесообразности применения методов рекуррентного робастного оценивания для повышения устойчивости оценок.

Работы проведены с использованием оборудования Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН». Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 14-19-00453).

Л и т е р а т у р а

1. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. Торнадо. М.: Физматлит, 2011.
2. Пиралишвили Ш. А., Поляев В. М., Сергеев М. Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Под ред. А. И. Леонтьева. М.: Энергомаш, 2000.
3. Ying S. J., Chang C. C. Exploratory model study of tornado-like vortex dynamics // J. Atm. Sci. 1970. V. 27. N. 1. P. 3—14.

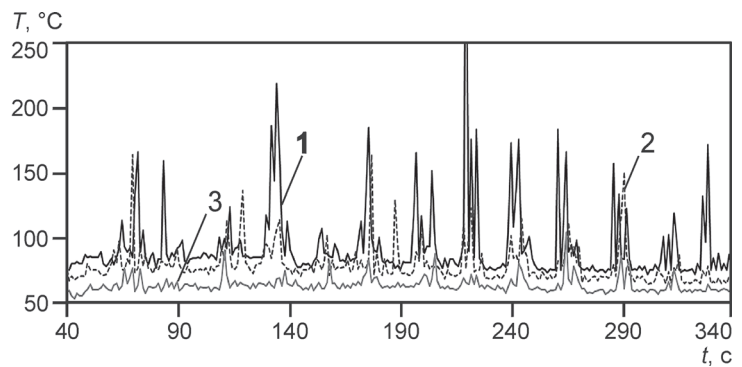


Рис. 3. Зависимость изменения максимальной температуры от времени в различных секторах термограммы. Высота пламени от поверхности стола:

1, 2, 3 — 700; 900; 1100 мм, соответственно

4. Ward N. B. The exploration of certain features of tornado dynamics using laboratory model // J. Atm. Sci. 1972. V. 29. N. 9. P. 1194—1204.
5. Haan F. L., Sarkar P. P., Gallus W. A. Design, construction and performance of a large tornado simulator for wind engineering applications // Eng. Struct. 2008. V. 30. P. 1146—1159.
6. Varaksin A. Yu., Romash M. E., Kopeitsev V. N., Taekin S. I. The possibility of physical simulation of air tornados under laboratory conditions // High Temp. 2008. V. 46. N. 6. P. 888—891.
7. Varaksin A. Y., Romash M. E., Kopeitsev V. N. Tornado-like gas-solid flow // The 6th Int. Symp. on multiphase flow, heat mass transfer and energy conversion. AIP Conference Proc. 2010. V. 1207. P. 342—347.
8. Varaksin A. Y., Romash M. E., Kopeitsev V. N., Gorbachev M. A. Experimental study of wall-free non-stationary vortices generation due to air unstable stratification // Int. J. Heat Mass Transfer. 2012. V. 55. P. 6567—6572.
9. Varaksin A. Y., Romash M. E., Kopeitsev V. N. Effect of net structures of wall-free non-stationary air heat vortices // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 64. P. 817—828.
10. Лобода Е. Л. Экспериментальное исследование глубины фронта горения торфа ИК-методами // Оптика атмосферы и океана. 2012. № 5. С. 451—455.
11. Башевская О. С., Бушуев С. В., Подураев Ю. В., Ковальский М. Г., Кайнер Г. Б., Ромаш Е. В. Исследование влияния температурных деформаций на точность линейных измерений // Измерительная техника. 2013. № 9. С. 34—36.
12. Телешевский В. И., Жирнов И. В., Дубенская М. А., Конов С. Г. Бесконтактное измерение температуры на поверхности материала INOX 304 L в зоне лазерного воздействия // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2013. № 4 (27). С. 61—64.
13. Кадышев А. Е. Измерение температуры пламени (Физические основы и методы). М.: Металлургиздат, 1961.
14. Вараксин А. Ю., Ромаш М. Э., Копейцев В. Н. О возможности генерации концентрированных огненных вихрей без использования принудительной закрутки // Доклады Академии наук. 2014. Т. 456. № 2. С. 159—161.
15. Телешевский В. И., Мастеренко Д. А. Рекуррентное робастное оценивание параметров в автоматизированных информационно-измерительных системах // Измерительная техника. 1997. № 4. С. 16—19.

Дата принятия 15.04.2015 г.