

само-по-себе даёт погрешность 5-10%. Поэтому задача поиска набора реакций (или иной модели горения) для пары «керосин-кислород» остаётся актуальной.

Список литературы

1. *Гардинер У.* Химия горения [под ред. У. Гардинера]. М.: Мир, 1988. 464 с.
2. *Gerasimov G.Ya., Shatalov O.P.* Kinetic mechanism of combustion of hydrogen-oxygen mixtures // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2013. V. 86. No. 5. P. 929-936.
3. Определение размеров зоны обратных токов трехмерной модели камеры сгорания ГТД с помощью пакета ANSYS Fluent / *В.В. Бирюк, М.Ю. Орлов, И.А. Зубрилин, Ю.А. Синеговский, А.В. Кривцов* // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2011. № 5(29). С. 44-48.
4. Моделирование процессов горения пропана при переводе камеры сгорания ГТД на газообразное топливо / *С.Г. Матвеев, А.М. Ланский, М.Ю. Орлов, В.Ю. Абрашкин, Д.Н. Дмитриев, И.А. Зубрилин, А.В. Семёнов* // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2011. № 5 (29). С. 168-178.
5. *Zubakov V., Egorychev V., Shabliy L.* Hydrogen-oxygen rocket engine design using CFD-modeling // Research Journal of Applied Sciences. 2014. V. 9. № 10. P. 660-663.
6. *Егорычев В.С., Шаблий Л.С., Зубанов В.М.* Моделирование внутрикамерного рабочего процесса РДМТ на газообразных кислороде и водороде в ANSYS CFX: учеб. пособие. Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2016. 140 с.

УДК 536.46

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ГЕНЕРАЦИИ СВОБОДНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ОГНЕННЫХ ВИХРЕЙ

Дермер П.Б., МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, dermer@bmstu.ru

Ключевые слова: огненные смерчи, огненные вихри, физическое моделирование.

Огненные смерчи наряду с воздушными смерчами являются примерами экологических катастроф, наносящими колоссальный ущерб окружающей среде и приводящими к многочисленным разрушениям и жертвам. Огненные вихри – вертикально ориентированные вращающиеся огненные факелы, драматически увеличивающие опасность природных и техноген-

ных пожаров и их последствия [1, 2]. По сравнению с воздушными смерчами огненные смерчи довольно редкие природные явления, которые возникают при крупных лесных пожарах, массовых пожарах в городах и авариях на крупных пожароопасных объектах нефтехимии, лесоперерабатывающей промышленности и других. Последствиями атомной бомбардировки Хиросимы и массированных бомбежек Гамбурга и Дрездена военно-воздушными силами США во время второй мировой войны стали исключительно опасные продолжительные неуправляемые пожары. После множественных одновременных возгораний в условиях города, плотно насыщенного горючими материалами, пламена сливались, образуя достаточно однородно горящую площадь, вследствие чего возникали огненные смерчи.

Представляется очевидным, что проведение полномасштабного физического моделирования огненных вихрей осложнено большими рисками, дороговизной и сложностями в контроле граничных условий. На сегодняшний день можно констатировать, что наибольший объем информации получается в результате проведения маломасштабных экспериментов.

Для генерации огненных вихрей в лабораторных условиях обычно используют два основных типа экспериментальных установок: 1) типа вращающегося экрана (rotating-screen type) [3–5] и 2) типа фиксированного каркаса (fixed-frame type) [6–8].

В установках первого типа [3–5] вращающийся экран, установленный концентрично с топливной емкостью, создает (привносит) тангенциальную составляющую скорости в месте его расположения, вызывающую закрутку втекающего в радиальном направлении (вследствие наличия пламени) потока воздуха. В установках второго типа [6–8] используются прозрачные, как правило, полуцилиндрические стенки, располагаемые симметрично на фиксированном расстоянии от пламени таким образом, чтобы окружающий их воздух мог входить внутрь только в тангенциальном направлении через зазоры (или прорези), получаемые путем некоторого перекрытия стенок. В таких установках отсутствует радиальная составляющая скорости в местах втекания воздуха, а циркуляция определяется параметрами пламени.

Целью настоящей работы является изучение возможности генерации нестационарных огненных вихрей лабораторных условиях без использования механических закручивающих устройств при горении осесимметрично располагаемых таблеток твердого топлива.

Для генерации нестационарных огненных вихрей использовалась простая установка, схема которой показана на рис. 1. Она располагалась в комнате с полом 1 площадью $6 \times 6 \text{ м}^2$, потолком 2 высотой 3,3 м на расстоянии 0,5 м от одной из стен 3. Экспериментальная установка представляла собой стол 4 высотой 0,35 м, имеющий три ножки 5. В качестве горизон-

тальной поверхности стола 4 выступал лист алюминия (марка Д16АМ) диаметром 1100 мм и толщиной 1,5 мм. Верхняя (подстилающая) поверхность алюминиевого листа была зачернена жаростойкой краской. Перед проведением экспериментов в центральной части подстилающей поверхности размещались таблетки уротропина 6 (гексаметиленetetрамин, химическая формула – $C_6H_{12}N_4$). Масса каждой таблетки – 21 г (диаметр – 40 мм). Теплота сгорания уротропина – 30 МДж/кг.

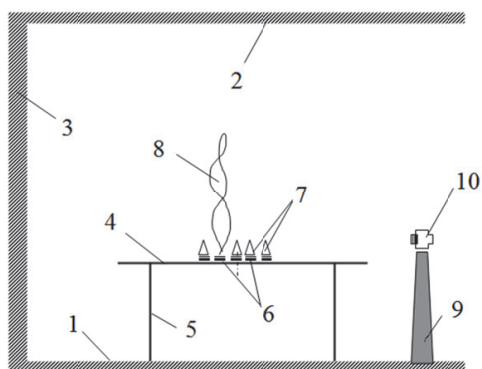


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для генерации свободных нестационарных огненных вихрей

При проведении эксперимента таблетки поджигались, формируя пламена 7 (рис. 1). Фотосъемка процесса горения и генерируемых вихревых структур проводилась с использованием располагаемого на стойке 9 цифрового фотоаппарата 10 (модель Canon SX20, Япония). Для измерения температуры воздуха применялась хромель-алюмелевая термопара.

В процессе горения таблеток наблюдалась генерация нестационарных огненных вихревых структур (рис. 2), высота которых значительно превосходила среднюю высоту фронта пламени над отдельными таблетками. При этом признаком возникновения огненных вихревых структур также являлось появление винтовых траекторий у нагретых частиц продуктов сгорания.

Таким образом, в работе показана возможность генерации нестационарных огненных вихрей без использования принудительной закрутки. Генерируемые огненные вихревые структуры являются лабораторными аналогами огненных вихрей и смерчей, часто возникающих при лесных пожарах и возгораниях на больших площадях в городских районах при плотной застройке, а также на лесоперерабатывающих предприятиях. Предполагается, что формирование огненных вихрей происходило вслед-

ствии неустойчивости процесса горения. В результате экспериментов получены первые данные по условиям генерации (количество таблеток, время начала генерации, мощность тепловыделения) огненных вихрей и их интегральным параметрам (время жизни, высота, диаметр).

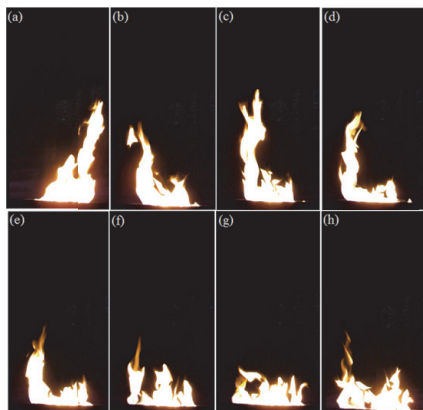


Рис. 2. Зафиксированный огненный вихрь

Список литературы

1. Gess D., Lutz W. Fire storm in Peshtigo: a town, its people and the deadliest fire in American history. New York: Henry Holt & Co, 2002. 252 p.
2. Forthofer J.M., Goodrick S.L. Review of vortices in wildland fire // J. Combust. 2011. Article ID 984363. 14 pp.
3. Emmons H.W., Ying S.J. The fire whirl // Proc. Combust. Inst. 1967. V. 11. P. 475–488.
4. Chuah K.H., Kushida G. The prediction of flame heights and flame shapes of small fire whirls // Proc. Combust. Inst. 2007. V. 31. P. 2599–2606.
5. Lei J., Liu N., Zhang L. and Satoh K. Temperature, velocity and air entrainment of fire whirl plume: a comprehensive experimental investigation // Combust. Flame. 2015. V. 162. P. 745–758.
6. Byram G.M., Martin R.E. Fire whirlwinds in the laboratory // Fire Control Notes. 1962. V. 33. P. 13–17.
7. Martin R.E., Pendleton D.W. and Burgess W. Effect of fire whirlwind formation on solid fuel burning rates // Fire Technol. 1976. V. 12. N. 1. P. 33–40.
8. Lei J., Liu N., Zhang L., Chen H., Shu L., Chen P., Deng Z., Zhu J., Satoh K. and de Ris J.L. Experimental research on combustion dynamics on medium-scale fire whirl // Proc. Combust. Inst. 2011. V. 33. P. 2407–2415.