

Физическое моделирование нестационарных огненных вихрей при горении таблеток твердого топлива

П.Б. Дермер, зав. управлением²,

А.Ю. Вараксин, зав. отделом¹, зав. кафедрой², чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва

²Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

e-mail: dermer@bmstu.ru

Ключевые слова:

нестационарные огненные вихри, генерация огненных вихрей, физическое моделирование.

Приводятся результаты экспериментального исследования свободных нестационарных огненных вихрей. Генерация вихревых структур происходила при горении таблеток уротропина (гексаметилентетрамина), расположенных на подстилающей поверхности (лист алюминия). В отличие от большинства предыдущих исследований в экспериментах не использовались механические закручивающие устройства и боковой воздушный поток для получения огненных вихревых структур. Проверялось предположение, что генерация огненных вихрей происходила вследствие неустойчивости процесса горения. В результате экспериментов получены данные об условиях генерации (количество таблеток, время начала генерации, мощность тепловыделения) огненных вихрей и их интегральных параметрах (время жизни, высота, диаметр).

1. Введение

Огненные смерчи наряду с воздушными смерчами являются примерами экологических катастроф, наносящими большой ущерб окружающей среде и приводящими к многочисленным разрушениям и жертвам. Огненные вихри — вертикально ориентированные вращающиеся огненные факелы, драматически увеличивающие опасность природных и техногенных пожаров и их последствия [1, 2]. По сравнению с воздушными смерчами огненные смерчи довольно редкие природные явления, возникают при крупных лесных пожарах, массовых пожарах в городах и авариях на крупных пожароопасных объектах нефтехимии, лесоперерабатывающей промышленности и др. (рис. 1 на с. 2 обложки). Последствиями атомной бомбардировки Хиросимы и массированных бомбежек Гамбурга и Дрездена военно-воздушными силами США во время второй мировой войны стали опасные продолжительные неуправляемые пожары [3]. После множественных од-

новременных возгораний в условиях города, плотно насыщенного горючими материалами, пламена сливались, образуя однородно горящую площадь, вследствие чего возникали огненные смерчи.

Вихревые (закрученные) течения используются для стабилизации процессов сжигания плохо горящих материалов (низкосортных углей, топлива растительного происхождения и т.п.). Известными техническими устройствами, в которых организуют закрутку потока, являются вихревые горелки и циклонные камеры сгорания. Наличие рециркуляционных зон обеспечивает интенсивное перемешивание и стабилизацию пламени, многократный рост времени нахождения топливо-воздушной смеси в зоне горения, что ведет к значительному увеличению полноты сгорания. Отметим, что генерация огненных концентрированных (компактные области горения с высокими значениями завихренности) вихрей возможна над поверхностью жидких или твердых горючих материалов при их сжигании.

В настоящее время можно констатировать, что наибольший объем информации получается в результате проведения маломасштабных экспериментов, необходимых для развития математических моделей огненных вихрей (смерчей) [4–8]. Представляется, что проведение полномасштабного физического моделирования огненных вихрей осложнено большими рисками, дороговизной и сложностью в контроле граничных условий.

Для генерации огненных вихрей в лабораторных условиях используют два типа экспериментальных установок: 1) типа вращающегося экрана (rotating-screen type) [9–11] и 2) типа фиксированного каркаса (fixed-frame type) [12–15]. В установках первого типа [9–11] вращающийся экран, установленный concentрично с топливной емкостью, создает (привносит) тангенциальную составляющую скорости в месте его расположения, вызывающую закрутку втекающего в радиальном направлении (вследствие наличия пламени) потока воздуха. Преимущество таких установок в простоте регулирования (изменения) величины циркуляции, несмотря на некоторую сложность изготовления вращающегося экрана и управления им. В установках второго типа [12–15] 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 всех описанных выше экспериментальных работ было получить стационарные (квазистационарные) огненные вихревые структуры с использованием тех или иных способов принудительной закрутки. При такой постановке ряд принципиальных фундаментальных задач (генерация, устойчивость, управление и т. п.) изучения огненных вихрей оставались вне рассмотрения. Имеется лишь несколько работ, авторы которых исследовали особенности генерации свободных (не ограниченных стенками) нестационарных огненных вихрей [16–18]. В [16] проведены модельные эксперименты по изучению возможности генерации огненных вихрей вследствие взаимодействия линейных фронтов пламени различной конфигурации и сносящего внешнего воздушного потока. В качестве топлива в экспериментах использовался этанол, размещаемый в желобах различной геометрии (*L*-образной с разными размерами сторон и углами расположения к сносящему воздушному потоку), в также нагреваемые никель-хромовые

полоски той же конфигурации. В [17, 18] изучены возможности генерации огненных вихрей в емкости с топливом, окруженной огненными «стенками» различной конфигурации. В экспериментах зафиксирована генерация огненных вихрей вследствие циркуляции воздуха из-за наличия зазоров в огненных «стенках», формируемых внешними пламенами.

Настоящая работа продолжает исследования [19, 20], в которых была продемонстрирована принципиальная возможность генерации свободных концентрированных огненных вихрей в лабораторных условиях без использования механических закручивающих устройств. Цель настоящей работы — изучить возможность генерации нестационарных огненных вихрей при горении располагаемых осесимметрично таблеток твердого топлива.

2. Экспериментальная установка

Для генерации нестационарных огненных вихрей использовалась простая установка, схема которой показана на рис. 2. 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 горизонтальной 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 — $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$). Масса каждой таблетки — 21 г (диаметр — 40 мм). Теплота сгорания уротропина — 30 МДж/кг.

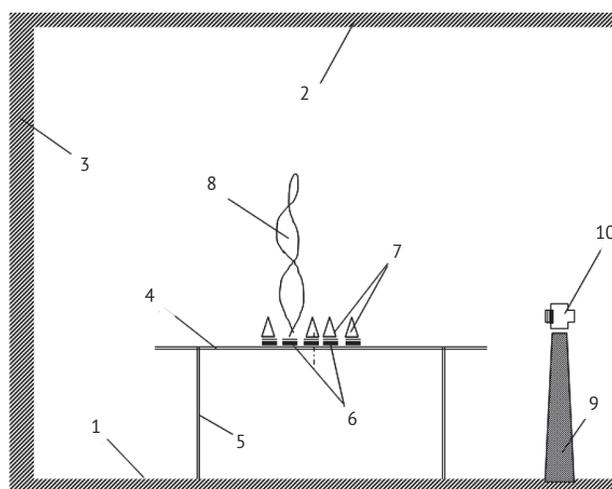


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для генерации свободных нестационарных огненных вихрей

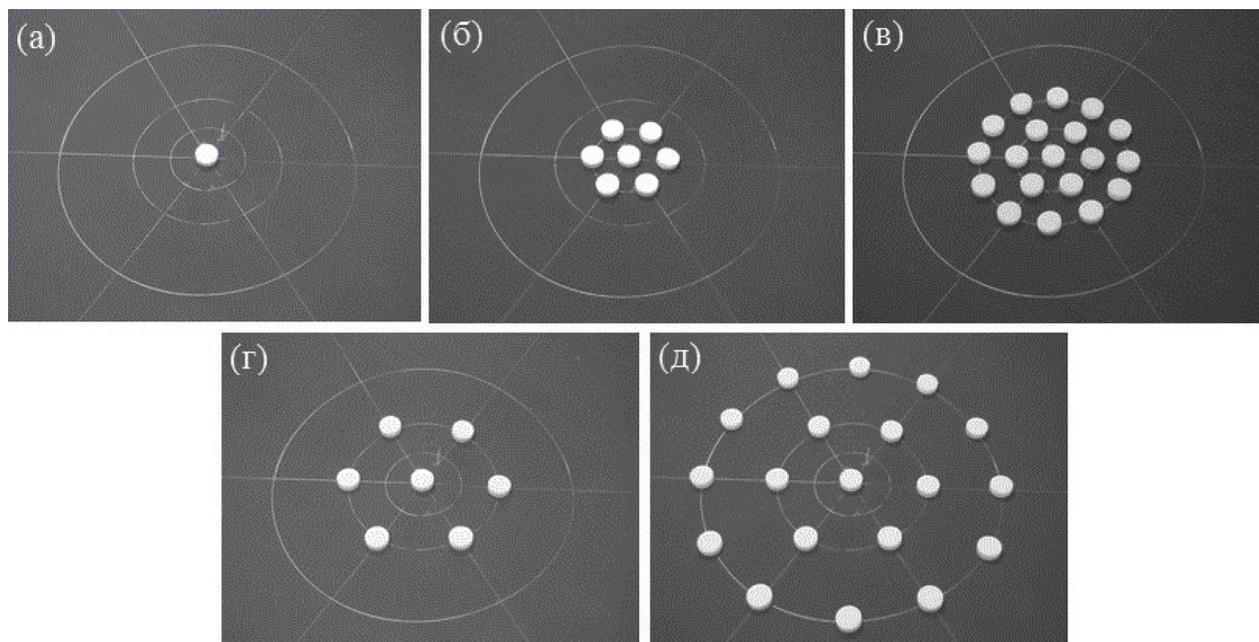


Рис. 3. Схема расположения таблеток горючего на подстилающей поверхности на разных режимах: а) № 1; б) № 2; в) № 3; г) № 4; д) № 5

Эксперименты проводились для разного числа таблеток и их расположения на подстилающей поверхности (рис. 3). Режимы 1, 2 и 3 соответствовали случаям горения 1, 7 и 19 таблеток соответственно. Режим 1 соответствует горению одной таблетки, располагаемой по центру алюминиевого листа. Для работы на режиме 2 на подстилающей поверхности дополнительно располагались 6 таблеток по окружности с диаметром 130 мм. Для режима 3 на подстилающей поверхности располагались еще 12 таблеток (по сравнению со вторым режимом) по окружности с диаметром 260 мм. При работе на режимах 4 и 5 использовались 7 и 19 таблеток горючего соответственно. В отличие от режимов 2 и 3 центры дополнительных 6 таблеток на режиме 4 и 12 таблеток на режиме 5 располагались на окружностях большего диаметров — 260 и 520 мм соответственно.

При проведении эксперимента таблетки поджигались, формируя пламена 7 (см. рис. 2). В процессе горения таблеток наблюдалась генерация огненных вихрей 8, высота которых, как правило, существенно превосходила среднеинтегральную высоту пламени над областью расположения горючего. 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. Описанная экспериментальная установка позволяет осуществлять сжигание твердого горючего с выделением

контролируемого количества теплоты, а также фотосъемку некоторых особенностей процесса сгорания таблеток и генерации огненных вихрей.

3. Результаты

Ниже приводятся некоторые экспериментальные результаты, касающиеся определения условий генерации огненных вихрей и их интегральных параметров.

На рис. 4 приведена зависимость массы таблеток от времени горения. Снижение массы горящих таблеток измерялось при помощи электронных весов с погрешностью 0,5 г. Вероятно, весь процесс сгорания таблеток можно разбить на три стадии: 1) поджиг и разгорание таблеток (продолжительность около 120 с); 2) квазистационарное горение (приблизительно 240 с); 3) затухание (360–600 с). Скорость горения для различных режимов (квазистационарная стадия) вычислялась с использованием данных рис. 4. Вычисленные значения скорости горения, нормированной (на одну таблетку) скорости горения и скорости тепловыделения приведены в таблице. Отличия в скорости горения для различных режимов можно объяснить различными условиями теплообмена в процессе горения. Максимальная скорость горения была зафиксирована при сжигании близко расположенных 7 и 19 таблеток, т. е. при работе на режимах 2 и 3. Малое расстояние между таблетками приводит к объединению пламен от отдельных таблеток в одно большое пламя, что ускоряет процесс горения.

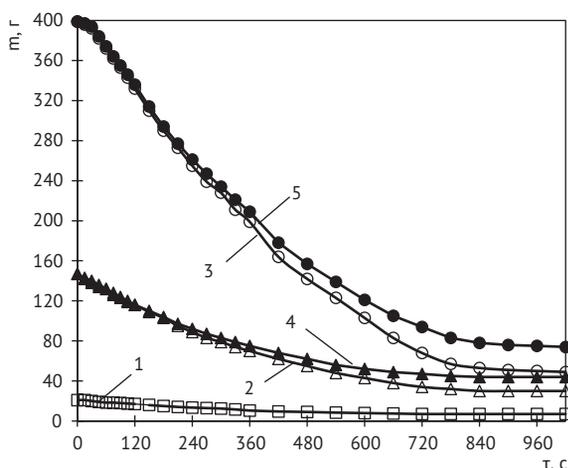


Рис. 4. Зависимость массы таблеток от времени горения для различных режимов: а) № 1; б) № 2; в) № 3; г) № 4; д) № 5

Зависимость температуры воздуха от времени на расстоянии 1 м от центра подстилающей поверхности приведена на рис. 5. Сильная зависимость температуры воздуха от времени связана с отмеченной выше существенной нестационарностью процесса горения таблеток горючего. Значительные отличия температур воздуха для различных режимов объясняются различием в тепловой мощности (скорости тепловыделения), приведенной в таблице.

Эксперименты выявили сильную зависимость высоты пламени от времени [20], также связанную с нестационарностью процесса горения таблеток. Сначала они разгораются — это приводит к росту высоты пламени (первая стадия). Затем следует непродолжительный период относительной стабилизации (вторая стадия), когда высота пламени изменяется слабо, вскоре начинается достаточно продолжительный период затухания таблеток (третья стадия). Необходимо отметить, что процесс горения обладает и собственной высокочастотной нестационарностью (неустойчивостью). Наблюдаемые в экспериментах

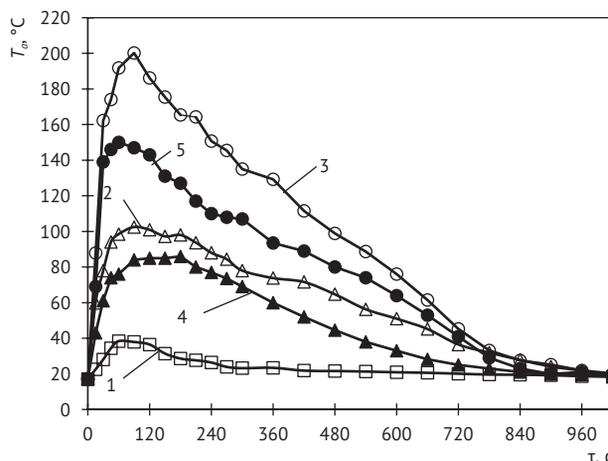


Рис. 5. Зависимость температуры воздуха от времени для различных режимов ($z = 1$ м): а) № 1; б) № 2; в) № 3; г) № 4; д) № 5

вихревые структуры существенно нестационарные и характеризуются относительно небольшим временем жизни и пространственно-временной неустойчивостью параметров (высота, диаметр, характерная скорость и др.).

В процессе горения таблеток наблюдалась генерация огненных вихревых структур, высота которых, как правило, значительно (до нескольких раз) превосходила среднеинтегральную высоту фронта пламени над областью расположения горючего. При этом признаком возникновения огненных вихревых структур было появление винтовых траекторий у нагретых частиц продуктов сгорания.

Многочисленные повторения опытов позволило сделать следующие заключения. Образование огненных вихревых структур наблюдалось лишь при сжигании 7 и 19 таблеток горючего, т. е. при работе в режимах 2–5. Количество и размеры генерируемых вихрей были значительно больше при работе на режимах 3 и 4, которые и были выбраны в качестве основных.

Фотосъемка производилась в ручном режиме с выдержкой 0,01 с. Покадровый анализ позволяет получать информацию о следующих параметрах процесса генерации огненных вихрей и их интегральных характеристиках: 1) временном диапазоне образования огненных вихревых структур, 2) области возникновения огненных вихрей, 3) количестве наблюдаемых огненных вихрей за один эксперимент, 4) времени жизни огненных вихревых структур, 5) высоте огненных вихрей, 6) диаметре огненных вихрей.

Многочисленное проведение экспериментов (режим 3) позволило сделать несколько важных заключений. Первые огненные вихри начинали образовываться через 4 минуты, а самые последние — через 12 мин после поджога таблеток. Генерация огненных

Таблица
Основные характеристики режимов горения

№	Количество таблеток	Начальная масса таблеток m , г	Скорость горения (квазистационарный режим) $m',$ г/с	Нормированная скорость горения (квазистационарный режим) $m'_1,$ г/с	Скорость тепловыделения (квазистационарный режим) $Q,$ кВт	Максимальная высота пламени H_{max} , м
1	1	21	0,024	0,024	0,72	0,18
2	7	147	0,192	0,0274	5,76	0,28
3	19	399	0,554	0,0292	16,6	0,66
4	7	147	0,171	0,0244	5,13	0,18
5	19	399	0,510	0,0268	15,3	0,18

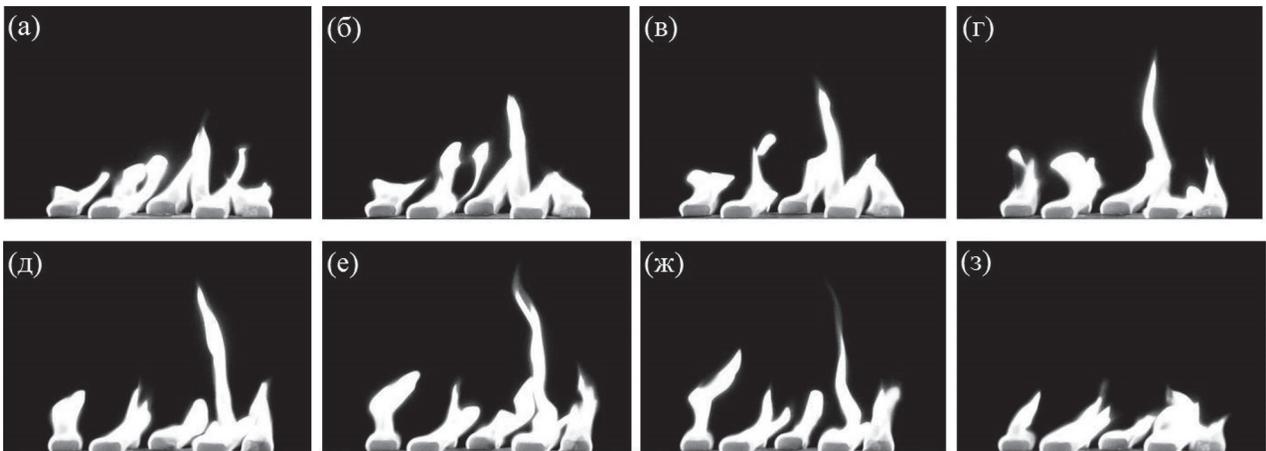


Рис. 7. Выборочные кадры с зафиксированным огненным вихрем в разные моменты времени (размер изображения 420×280 мм), режим 4: а) $t = 0$; б) 0,03 с; в) 0,06 с; г) 0,51 с; д) 0,63 с; е) 0,66 с; ж) 0,69 с; з) 0,72 с

вихревых структур происходила как в центре области расположения горючего, так и на ее периферии. Количество фиксируемых огненных вихрей — до 15 за один эксперимент. Несколько раз в экспериментах наблюдалась практически одновременная генерация сразу двух огненных вихревых структур. Время жизни подавляющего большинства генерируемых вихрей составляло от 0,7 до 3 с; наибольшая высота огненных вихрей достигала 0,9 м, а их максимальный диаметр — 0,05 м.

Процесс формирования огненного вихря, по-видимому, сопровождается заметным радиальным притоком воздуха со всех направлений к основанию основного (центрального) конвективного потока и сопутствующим закручиванием потока относительно вертикальной оси вследствие наличия градиентов скоростей и температур. Поток продуктов сгорания в огненном вихре состоит из комбинации относительно тонких вихревых нитей, вращающихся и взаимодействующих друг с другом.

Выборочные кадры с типичным зафиксированным огненным вихрем при работе на режиме 3 показаны на рис. 6 (см. с. 2 обложки). Каждый из приведенных кадров соответствует определенному моменту времени, отсчитываемому от начала генерации огненного вихря. Можно сделать вывод, что жизненный цикл рассматриваемой вихревой структуры составлял примерно 2 с. Его можно разделить на две стадии: 1) генерация и формирование вихря, сопровождающиеся увеличением его высоты (рис. 6а–г); 2) ослабление и распад вихря, выражающиеся в уменьшении высоты пламени (рис. 6д–з). Максимальная высота данного вихря равнялась $H_{\max} = 0,9$ м и примерно в 3 раза превышала среднеинтегральную высоту пламени в момент его генерации.

Некоторые кадры с типичным наблюдаемым огненным вихрем при работе на режиме 4 приведены на рис. 7. Как и ранее, каждый показанный кадр соответствует определенному моменту времени от начала генерации вихревой структуры. Из приведенных данных можно сделать вывод, что жизненный цикл рассматриваемой вихревой структуры составлял приблизительно 0,7 с. Его также можно разделить на две стадии: 1) генерация и формирование вихря (рис. 7а–д); 2) ослабление и диссипация (распад) вихря (рис. 7е–з). Максимальная высота анализируемого вихря равнялась $H_{\max} = 0,25$ м и примерно в 2–2,5 раза превышала среднеинтегральную высоту пламени в момент его генерации. Отметим, что геометрия (высота, диаметр) и время жизни огненных вихрей при работе на режиме 4 значительно уступали соответствующим характеристикам для режима 3 вследствие существенного различия в тепловой мощности (скорости тепловыделения) данных режимов (см. таблицу).

4. Выводы

Показана возможность физического моделирования нестационарных огненных вихрей без использования принудительной закрутки. Описана простая экспериментальная установка, позволяющая осуществлять генерацию огненных вихревых структур путем сжигания твердого топлива (уротропина), располагаемого на металлической подстилающей поверхности. Получены данные об условиях генерации и интегральных параметрах наблюдаемых вихрей. Генерируемые огненные вихревые структуры выступают лабораторными аналогами огненных вихрей и смерчей, возникающих при лесных пожарах и возгораниях на больших площадях в городских районах

при плотной застройке, а также на лесоперерабатывающих предприятиях.

Авторы выражают признательность М.Э. Ромашу и В.Н. Копейцеву за помощь при подготовке и проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gess D., Lutz W. Fire Storm in Peshtigo: A Town, Its People and the Deadliest Fire in American History, Henry Holt Publishing, 2002.
2. Forthofer J.M., Goodrick S.L. Review of Vortices in Wildland Fire // J. Combust. — 2011. — Article ID984363. — 14 pp.
3. Ebert C.H.V. Hamburg's Fire Storm Weather // NFPA Quarterly. — 1963. — V. 56. — P. 253–260.
4. Battaglia F., Rehm R.G., Baum H.R. The Fluid Mechanics of Fire Whirls: An Inviscid Model // Phys. Fluids. — 2000. — V. 12. — № 11. — P. 2859–2867.
5. Battaglia F., McGrattan K.B., Rehm R.G., Baum H.R. Simulating Fire Whirls // Combust. Theory Modell. — 2000. — V. 4. — P. 123–138.
6. Snegirev A.Y., Marsden J.A., Francis J., Makhviladze G.M. Numerical Studies and Experimental Observations of Whirling Flames // Int. J. Heat Mass Transfer. — 2004. — V. 47. — № 12–13. — P. 2523–2539.
7. Zhou R., Wu Z. — N. Fire Whirls Due to Surrounding Flame Sources and the Influence of the Rotation Speed on the Flame Height // J. Fluid Mech. — 2007. — V. 583. — P. 313–345.
8. Kuwana K., Morishita S., Dobashi R., Chuah K.H., Saito K. The Burning Rate's Effect on the Flame Length of Weak Fire Whirls // Proc. Combust. Inst. — 2011. — V. 33. — P. 2425–2432.
9. Emmons H.W., Ying S.J. The Fire Whirl // Proc. Combust. Inst. — 1967. — V. 11. — P. 475–488.
10. 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.
11. Lei J., Liu N., Zhang L., Satoh K. Temperature, Velocity and Air Entrainment of Fire Whirl Plume: a Comprehensive Experimental Investigation // Combust. Flame. — 2015. — V. 162. — P. 745–758.
12. Byram G.M., Martin R.E. Fire Whirlwinds in the Laboratory // Fire Control Notes. — 1962. — V. 33. — P. 13–17.
13. Byram G.M., Martin R.E. The Modeling of Fire Whirlwinds // Forest Science. — 1970. — V. 16. — № 4. — P. 386–399.
14. Martin R.E., Pendleton D.W., Burgess W. Effect of Fire Whirlwind Formation on Solid Fuel Burning Rates // Fire Technology. — 1976. — V. 12. — № 1. — P. 33–40.
15. Lei J., Liu N., Zhang L., Chen H., Shu L., Chen P., Deng Z., Zhu J., Satoh K., de Ris J.L. Experimental Research on Combustion Dynamics on Medium-Scale Fire Whirl // Proc. Combust. Inst. — 2011. — V. 33. — P. 2407–2415.
16. Kuwana K., Sekimoto K., Minami T., Tashiro T., Saito K. Scale-Model Experiments of Moving Fire Whirl over a Line Fire // Proc. Combust. Inst. — 2013. — V. 34. — P. 2625–2631.
17. Zhou R., Wu Z.N., Fire Whirls due to Surrounding Flame Sources and the Influence of the Rotation Speed on the Flame Height // J. Fluid Mech. — 2007. — V. 583. — P. 313–345.
18. Zhou R. Applications of the Equivalent Gap Fraction Criterion Method for Fire Whirl Risk Evaluation and Prevention in a Real Fire Disaster // Fire Technology. — 2014. — V. 50. — P. 143–159.
19. Varaksin A. Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N. The Possibility of Generation of Concentrated Fire Vortices without Forced Swirling // Doklady Physics. — 2014. — V. 59. — № 5. — P. 203–205.
20. Varaksin A. Yu., Protasov M.V., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Generation of Free Concentrated Fire Vortices under Laboratory Conditions // High Temperature. — 2015. — V. 53. — № 4. — P. 595–598.

Physical Modeling of Non-Stationary Fire Whirls by Burning of Solid Fuel Pellets

P.B. Dermer, Head of the Department, Bauman Moscow State Technical University

A.Y. Varaksin, Doctor of Physics and Mathematics, Professor,

A.I. Leontiev, Doctor of Engineering, Professor, Member of RAS, Rector's Advisor, Bauman Moscow State Technical University

The results of experimental study of wall-free non-stationary fire vortices are presented. The generation of vortical structures occurred by the burning of pellets of urotropine (hexamethylenetetramine) located on the underlying surface (sheet of aluminum). Unlike most previous research experiments the mechanical twisting devices and the shear air stream to get fire vortex structures were not used. It was assumed that the generation of fire whirls occurred due to the instability of the combustion process. Experimental data on the conditions of fire whirls generation (number of pellets, generation start time and thermal power) and their integral parameters (life time, height and diameter) have been received.

Keywords: non-stationary fire whirls, generation of fire whirls, physical modeling.