

# Физическое моделирование концентрированных огненных вихрей (обзор)

**А.Ю. Вараксин**, зав. отделом<sup>1</sup>, зав. кафедрой<sup>2</sup>, чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор

<sup>1</sup>Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

e-mail: varaksin\_a@mail.ru

## Ключевые слова:

огненные вихри  
концентрированные вихри  
физическое моделирование.

*Огненные смерчи являются примером экологической катастрофы, наносящей огромный ущерб окружающей среде и приводящей к многочисленным разрушениям и человеческим жертвам. Огненные вихри — редкая, но потенциально катастрофическая форма огня, драматически увеличивающая опасность происходящих природных и техногенных пожаров и их последствия. Они возникают при крупных лесных пожарах, массовых пожарах в городах и авариях на крупных пожароопасных объектах нефтехимии, лесоперерабатывающей промышленности и т.п. Полномасштабное физическое моделирование огненных вихрей осложнено большими рисками, дороговизной и сложностями контролирования граничных условий, поэтому наибольший объем информации получают при проведении мало-масштабных экспериментов. В обзоре приводится описание экспериментальных установок различных типов для генерации стационарных и нестационарных огненных вихрей и изучения их характеристик. Представлены и проанализированы результаты экспериментов по скорости горения и основным параметрам огненных вихрей (высота, скорость, температура). Проведены оценки критической скорости бокового ветра, при которой образуются наиболее интенсивные огненные вихри. Рассмотрены особенности и условия генерации огненных вихрей при пожарах в замкнутых пространствах.*

## 1. Введение

Воздушные и огненные смерчи являются примерами экологических катастроф, наносящих огромный ущерб окружающей среде и приводящих к многочисленным разрушениям и человеческим жертвам. Огненные вихри — редкая, но потенциально катастрофическая форма огня. Эти вертикально ориентированные вращающиеся огненные факелы драматически увеличивают опасность происходящих природных и техногенных пожаров и их последствия [1–4]. 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 (рис. 1, см. обл., с. 3). Последствиями атомной бомбардировки

Хиросимы (1945 г.), массированных бомбардировок Гамбурга (1943 г.) и Дрездена (1945 г.), Касселя и Дармштадта стали опасные продолжительные неуправляемые пожары [5]. После множественных одновременных возгораний в условиях города, плотно насыщенного горючими материалами, пламена сливались, образуя достаточно однородно горящую площадь, вследствие чего возникли огненные смерчи. В 1926 г. в Калифорнии (США) в результате удара молнии в нефтехранилище также наблюдались огненные смерчи [6].

Вихревые (закрученные) течения используются для стабилизации высокоинтенсивных процессов горения. Хорошо известны технические устройства, в которых организуют закрутку потока, — вихревые горелки и циклонные камеры сгорания. Эти устройства используются для сжигания плохо го-

рящих материалов (низкосортных углей, топлива растительного происхождения и т.п.). Наличие рециркуляционных зон обеспечивает интенсивное перемешивание, стабилизацию пламени и многократное увеличение времени нахождения топливо-воздушной смеси в зоне горения, что ведет к существенному увеличению полноты сгорания. В процессе сжигания жидких или твердых горючих материалов возможна генерация огненных концентрированных вихрей над их поверхностью.

Образование концентрированных огненных вихрей — компактных пространственных областей горения, характеризующихся высокими значениями завихренности, — может играть важную роль в случае стратификации и асимметричных тепловых условий, наличия рельефных поверхностей, обтекания тел, в камерах сгорания энергетических установок, двухфазных потоках, различных пламенах и т. п. В настоящем обзоре проанализированы возможности физического моделирования концентрированных огненных вихрей в лабораторных условиях.

## 2. Основные физические процессы. Параметры огненных вихрей

Энергия огненных вихрей напрямую зависит от количества теплоты, выделяемого в процессе горения. Все огненные вихревые структуры в зависимости от их интенсивности, определяемой характерным диаметром и величиной азимутальной скорости, предлагается разделить на четыре класса [7]:

- 1) огненные «дьяволы» (диаметр от 1 до 10 м, скорость до 10 м/с);
- 2) огненные вихри (диаметр от 10 до 30 м, скорость от 10 до 30 м/с);
- 3) огненные торнадо (диаметр от 30 до 300 м, скорость до 40 м/с);
- 4) огненные штормы (диаметр от 300 до 3000 м, скорость более 50 м/с).

В настоящее время можно констатировать, что наибольший объем информации получают в результате проведения маломасштабных экспериментов. Представляется очевидным, что проведение полномасштабного физического моделирования огненных вихрей осложнено большими рисками, дороговизной и сложностями в контроле граничных условий.

*Основные физические процессы. Характерные масштабы.* Сначала сделаем некоторые важные замечания. Известно, что развитие обычных пламен контролируется двумя основными процессами:

- 1) диффузией (перемешиванием) топлива и воздуха, отвечающей за химическую «картину» пламени;
- 2) конвекцией, отвечающей за явление плавучести и вызываемый ею радиальный приток воздуха.

Можно ввести некоторый параметр  $\Pi$  для установления важности того или иного из указанных процессов в виде [8]

$$\Pi = \frac{\tau_c}{\tau_d}, \quad (1)$$

где  $\tau_c$ ,  $\tau_d$  — характерное время конвективного и диффузионного процессов, представляемое как

$$\tau_c = \frac{R}{U_r}, \quad (2)$$

$$\tau_d = \frac{R^2}{D}, \quad (3)$$

где:  $R$  — размер (радиус) емкости с топливом;  $U_r$  — характерная радиальная скорость втекающего в зону горения потока;  $D$  — коэффициент диффузии топлива в окружающий воздух.

Учитывая (2) и (3), из выражения (1) получаем

$$\Pi = \frac{D}{U_r R}. \quad (4)$$

В случае  $\Pi \gg 1$  образование и развитие пламени определяется преимущественно диффузией, объемный унос горючего с поверхности пропорционален размеру емкости и интенсивности процесса диффузии, т.е.

$$Q \sim RD. \quad (5)$$

Если же  $\Pi \ll 1$ , то основным механизмом будет конвективный перенос, объемный расход топлива пропорционален квадрату размера емкости и радиальной скорости воздуха, втекающего в зону горения, т.е.

$$Q \sim R^2 U_r. \quad (6)$$

*Основные параметры огненных вихрей. Простые оценки.* В [9] развита простая аналитическая модель для описания огненного вихря, генерируемого при горении метанола во вращающейся емкости. Для описания течения в ядре вихря был взят известный вихрь Бюргерса, в то время как для течения за его пределами применена модель идеальной жидкости. С целью получить соотношение для высоты пламени в случае наличия вихревого течения использовалось классическое решение Бурке–Шумана для диффузионного пламени (одно топливо и один окислитель) [10], обобщенное в [11] на случай обычных газовых потоков и учитывающее влияние силы плавучести.

В результате анализа сделан вывод, что высота пламени огненного вихря является функцией только объемного расхода топлива, который зависит от температуры пламени и размера ядра вихря.

Описанная выше простая модель получила развитие в [8]. Для анализа использовалось приведенное в [9, 11] выражение пропорциональности относительной высоты пламени и объемного уноса топлива

$$\frac{H}{R} \sim \frac{Q}{RD} \approx \frac{Q}{Rv}, \quad (7)$$

где:  $H$  — высота пламени;  $R$  — радиус емкости с топливом;  $v$  — коэффициент кинематической вязкости.

Для значения радиальной скорости на границе ядра вихря можно записать, как в [8],

$$U_r \sim \frac{v}{r_v} \approx \frac{D}{r_v}, \quad (8)$$

где  $r_v$  — радиус ядра вихря.

Для пламени, контролируемого конвекцией ( $\Pi \ll 1$ ), с учетом (6) и (8) для объемного расхода топлива имеем:

$$Q \sim R^2 D / r_v. \quad (9)$$

Таким образом, из (7) с учетом (5) и (9) можно получить

$$H \sim R^2 / r_v \text{ для } r_v \ll R \text{ (} \Pi \ll 1 \text{)}, \quad (10)$$

$$H \sim R \text{ для } r_v \gg R \text{ (} \Pi \gg 1 \text{)}. \quad (11)$$

### 3. Исследования огненных вихрей

В ряде работ изучалось влияние огненных вихрей на увеличение скорости горения различных видов топлива [12–18].

Одно из первых экспериментальных исследований огненных вихрей описано в [12], где в качестве горючего использовался ацетон, располагаемый в цилиндрической емкости. Для создания закрутки формирующегося пламени использовался вращающийся экран (рис. 2). Были произведены измерения распределения температур по радиусу на фиксированных расстояниях от бассейна (емкости) с горючим при различных значениях циркуляции окружающего потока. Для получения некоторых средних значений температур предприняты попытки исключить влияние «блуждания» пламени и турбулентных пульсаций. В итоге авторы выявили основную тенденцию влияния внешней (созданной) циркуляции на развивающееся пламя: увеличение циркуляции одно-

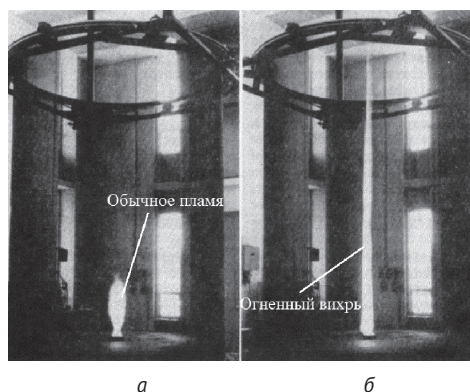


Рис. 2. Фотографии экспериментальной установки с вращающимся экраном для генерации огненных вихрей:

$a$  — обычное горение ацетона при неподвижном экране (высота пламени 0,45 м);  $b$  — горение ацетона с образованием огненного вихря (высота вихря 4,5 м, частота вращения экрана 4 об./мин)

временно приводит к уменьшению среднего радиуса и увеличению средней температуры пламени. Следовательно, с ростом скорости вращения экрана происходило удлинение и сужение пламени. Как было предположено, это происходило потому, что резко возрастало вертикальное ускорение, вызываемое плавучестью. В случае генерации огненных вихрей скорость горения ацетона возрастала до 7 раз. К сожалению, в [9] не проводилось измерение полей скоростей, производимых генерируемыми течениями.

В [13–18] для закрутки входящего воздушного потока использовался тангенциальный подвод воздушного потока. На рис. 3 приведена фотография установки, используемой авторами [13] для генерации огненных вихрей.

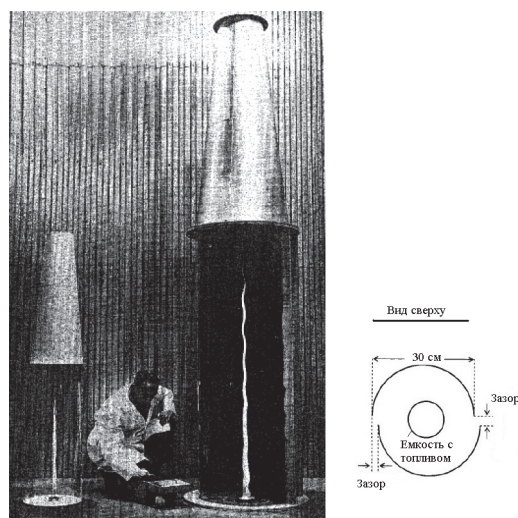


Рис. 3. Фотография (слева) экспериментальной установки с фиксированным каркасом для генерации огненных вихрей и ее упрощенная схема (справа)

В [14] создана специальная цилиндрическая камера высотой 2,32 м и диаметром 0,84 м. В нижней части камеры был сделан спиральный ввод, необходимый для создания вращательной (тангенциальной) компоненты скорости, необходимой для формирования вихревого потока. Исследовалось влияние огненных вихрей на скорость горения четырех разных деревянных кубиков. В случае экспериментов по измерению скорости безвихревого горения спиральный ввод демонтировался. Кубики склеивались из одинаковых палочек длиной 10,16 см, имеющих квадратное сечение со сторонами 0,64, 1,27, 1,9 и 2,54 см. Все кубики имели почти одинаковые размеры (8,9–10,4 см). Плотность упаковки была равна 0,56 для кубика из 117 маленьких палочек и 0,75 для кубика из 12 крупных палочек. Проведенные эксперименты не выявили зависимость скорости безвихревого горения ни от размера палочек, ни от содержания влаги в них (она варьировала от 1 до 15%). В случае сжигания в вихревом потоке скорость горения возрастала от 1,4 до 4,2 раза для кубиков из крупных влажных палочек и кубиков из самых маленьких сухих палочек соответственно. Тем не менее зависимость скорости горения от размера палочек не была очевидной, вероятно, вследствие высокой плотности их упаковки. В [15] обнаружено увеличение скорости горения деревянных палочек от 2 до 5 раз (в зависимости от их размера и расположения в пространстве) в случае возникновения огненных вихрей.

Изучение поведения пламен в присутствии внешней циркуляции было продолжено в [16]. В этом исследовании проведены измерения распределения мгновенных азимутальных скоростей по радиусу. Для интерпретации полученных данных по скоростям было предположено, что течение состоит из вращающегося кругового ядра, где скорость линейно возрастает с радиусом, окруженного областью потенциального течения, где скорость падает обратно пропорционально радиусу.

В [17, 18] было проведено как физическое, так и математическое моделирование (без учета горения). В этих исследованиях пламя было окружено открытым сверху корпусом, состоящим из четырех стен. С целью организации вращения генерируемого пламенем восходящего потока на каждой из угловых стен были выполнены вертикальные зазоры на всю высоту корпуса. Авторы предполагали, что самоорганизованный вихрь более реалистичен и предпочтительнее по сравнению с вихрями, генерируемыми с использованием принудительной закрутки [12], для физического моделирования огненных смерчей, возникающих при городских и лесных пожарах. Однако в описываемых экспериментах отсутствовала воз-

можность варьирования циркуляции на формирование огненного вихря и сравнения характеристик пламени в случаях отсутствия циркуляции и ее увеличения (как это было сделано в [12]).

Таким образом, уже на заре систематических исследований вопросов генерации и динамики огненных смерчей были предложены два основных вида экспериментальных установок: 1) типа вращающегося экрана (rotating-screen type) [12] и 2) типа фиксированного каркаса (fixed-frame type) [13–18]. В установках *первого типа* 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 (см. рис. 2). Преимущество таких установок в простоте регулирования (изменения) величины циркуляции, несмотря на некоторую сложность изготовления вращающегося экрана и управления им. В установках *второго типа* 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 (см. рис. 3). В таких установках отсутствует радиальная составляющая скорости в местах втекания воздуха, а циркуляция определяется параметрами пламени. Отметим, что циркуляция может варьироваться посредством изменения размеров прорезей, но это обычно не делается.

Таким образом, в экспериментальных установках двух описанных выше типов для генерации огненных вихрей реализуются различные граничные условия: в одном случае — отличная от нуля радиальная скорость, а в другом — нулевая радиальная скорость. Из-за простоты конструкции исследователи (как это будет показано ниже) чаще используют установки с фиксированным каркасом (стенками).

#### 4. Исследование свободных и ограниченных стационарных огненных вихрей

Ниже будут описаны экспериментальные работы, посвященные изучению особенностей генерации и основным характеристикам (высота, реализуемые скорости и температура) стационарных огненных вихрей.

*Скорость горения. Высота огненных вихрей.* Экспериментальное изучение особенностей формирования огненных вихрей и их динамики выполнено в [19, 20]. Установка представляла собой квадратный корпус с размерами  $2 \times 2 \times 15$  м, четыре стены которого были

выполнены из закаленного стекла (рис. 4). Корпус был открыт сверху. В каждой из стен был выполнена вертикальная прорезь шириной 20 см таким образом, что в каждом углу корпуса формировались зазоры, способствующие закрутке засасываемого вследствие конвекции воздуха извне и необходимые для формирования огненного вихря. В основании корпуса располагался деревянный стол (2×2 м), выполненный из сосны и имеющий в центре круглое углубление диаметром 60 см и глубиной 10 см. Использование деревянных колец различных размеров, вставляемых в углубление, позволяло формировать емкости для жидкого топлива глубиной 10 см разных диаметров ( $D = 10 - 55$  см).

В [19, 20] предпринята попытка установить зависимость основных характеристик огненных вихрей (скорость горения, высота пламени и др.), отличающих их от обычных пламен. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что огненные вихри характеризуются более высокими скоростями горения, температурой и высотой пламени по сравнению с обычными пламенами [19].

Скорость горения при формировании огненных вихрей зависит от диаметра емкости с топливом. С ростом диаметра емкости (как и для обычных пламен) происходит увеличение скорости горения. Получена следующая эмпирическая зависимость для скорости горения:

$$\bar{G} = 0,080 [1 - \exp(-8,97D)], \quad (12)$$

где:  $\bar{G}$  — масса топлива, уносимая с единицы площади в единицу времени ( $\text{кг}/\text{м}^2\text{с}$ );  $D$  — диаметр емкости с топливом (м).

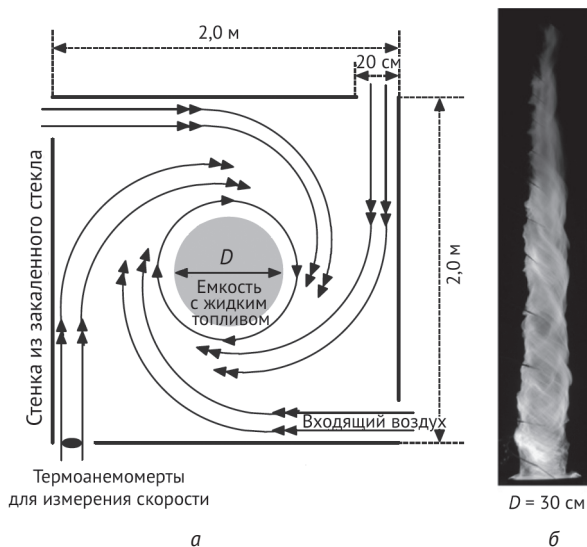


Рис. 4. Схема экспериментальной установки для генерации огненных вихрей и фотография вихря:  
а — вид сверху на схему экспериментальной установки; б — пример сформированного огненного вихря

Аналогичные соотношения для скоростей горения обычных пламен имеют вид, как в [21–25]:

$$\bar{G} = 0,072 [1 - \exp(-2,49D)], \quad (13)$$

$$\bar{G} = 0,087 [1 - \exp(-0,61D)]. \quad (14)$$

Из (12)–(14) видно, что в случае образования (генерации) огненных вихрей рост скорости горения происходит намного быстрее. Например, было показано, что скорость горения в случае формирования огненного вихря при  $D = 0,2$  м достигает примерно той же величины, как и в случае обычного пламени при  $D = 1$  м. Напомним, что намного ранее в [26] найдено, что для топливных емкостей, диаметр которых превышает 1 м, горение будет турбулентным, так как число Рейнольдса восходящего потока топливных паров, покидающих сосуд, будет превышать 500. Как следствие, дальнейшего роста скорости горения с увеличением диаметра емкости не происходит.

Высота огненного вихря возрастала с увеличением диаметра емкости с топливом. Так, при  $D = 0,2$  м высота огненного вихря изменялась в диапазоне  $H = 2,3 - 3,5$  м, в то время как при  $D = 0,5$  м она варьировалась уже в диапазоне  $H = 3,6 - 5,2$  м.

Анализ экспериментальных данных позволил предложить зависимость для безразмерной высоты пламени:

$$H' = H / D = f(Q', \Gamma') = k(Q'\Gamma'^2)^m, \quad (15)$$

где:  $Q'$  — безразмерная скорость тепловыделения;  $\Gamma'$  — безразмерная циркуляция;  $k$  и  $m$  — константы, определяемые экспериментальным путем. Для условий описываемого исследования было получено:  $k = 1,93$  и  $m = 0,33$ .

Обезразмеривание скорости тепловыделения  $Q'$  ( $\text{Дж}/\text{с}$ ) и циркуляции  $\Gamma'$  ( $\text{м}^2/\text{с}$ ) производилось следующим образом:

$$Q' = Q / (\rho_\infty c_{p\infty} T_\infty g^{1/2} D^{5/2}), \quad (16)$$

$$\Gamma' = \Gamma / (g^{1/2} D^{3/2}), \quad (17)$$

где:  $\rho_\infty$ ,  $c_{p\infty}$ ,  $T_\infty$  — плотность, теплоемкость и температура окружающего воздуха соответственно;  $g$  — ускорение свободного падения.

Изучение влияния циркуляции потока на динамику огненных вихрей и их характеристики продолжено в [20]. В этой работе предпринята попытка разделить влияние двух основных определяющих высоту пламени факторов: 1) скорости выгорания топлива; 2) циркуляции. Сделано предположение, что увеличение

высоты пламени вследствие генерации вихря определяется лишь циркуляцией. В результате проведенных экспериментов предложено следующее соотношение для относительной высоты пламени  $H$ :

$$H^* = H / H_p = 0,36(\Gamma')^{1,11}, \quad (18)$$

где:  $H$  — высота огненного вихря;  $H_p$  — высота пламени в отсутствие огненного вихря (вихрь приводит к росту пламени в локальной области генерации вихря);  $\Gamma'$  — безразмерная циркуляция.

В [27] приведены результаты экспериментальных исследований влияния скорости горения на высоту пламени слабых (циркуляция имеет пренебрежимо малое значение) вихрей. Показано, что применение незначительной циркуляции приводило к трехкратному росту высоты пламени в случае горения этанола, в то время как высота пламени газовой (метан) горелки не изменялась. Объяснением этого может служить то обстоятельство, что скорость горения метана поддерживалась постоянной, а скорость горения этанола возрастала вследствие дополнительного притока тепла при наложении циркуляции. Таким образом, было показано, что скорость горения может оказывать существенное влияние на высоту пламени даже в условиях слабой циркуляции.

*Распределения температур и скоростей.* В [28] проведено комплексное экспериментальное исследование распределений температуры, скорости (в осевом и тангенциальном направлениях) и процесса вовлечения воздуха при формировании огненного вихря в случае горения пропана (диаметр газовой горелки 30 см) для разных скоростей тепловыделения ( $Q = 25 - 300$  кВт). Было обнаружено сильное увеличение высоты огненных вихрей с ростом скорости тепловыделения: высота вихря варьировала в диапазоне от 0,65 до 1,77 м для  $Q = 25$  кВт и от 4,33 до 6,51 м для  $Q = 300$  кВт. Полученные данные отчетливо выявили существование трех основных областей по всей высоте вихря в зависимости от безразмерной координаты  $Z = z/H$  ( $z$  — вертикальная координата,  $H$  — осредненная высота огненного вихря): 1) непрерывное (сплошное) пламя ( $0 \leq Z \leq 0,77$ ); 2) прерывистое пламя ( $0,77 \leq Z \leq 1,22$ ); 3) струйное пламя ( $Z > 1,22$ ).

Распределения относительной температуры по высоте огненного вихря приведены на рис. 5, а. (см. обл., с. 3). Видно, что в области непрерывного пламени относительная температура растет очень слабо ( $\Delta T_c \sim Z^{0,06}$ ) во всем диапазоне изменения скоростей тепловыделения, а само превышение температуры ( $\Delta T_c \sim 1000$  °С) намного больше, чем в случае обычного (безвихревого) пламени ( $\Delta T_c \sim 850$  °С). Это говорит о менее интенсивном перемешивании горя-

чих продуктов и холодного втекающего воздуха в случае формирования огненного вихря. В областях прерывистого и струйного пламени наблюдалось резкое падение температуры, особенно значительное при высоких скоростях тепловыделения.

На рис. 5, б (см. обл., с. 3) показано распределение безразмерной осевой скорости по высоте огненного вихря. Отчетливо наблюдается рост осевой скорости в области сплошного пламени ( $U_{zc} / U_{zc \max} \sim Z^{1/3}$ ) вплоть до достижения максимального значения для всех скоростей тепловыделения, а затем ее резкое снижение в областях прерывистого и струйного пламени.

Среди работ российских авторов отметим исследование [29–34], в которых изучены особенности генерации и измерены некоторые характеристики свободных стационарных огненных вихрей.

Попытка изучить структуру течения в огненном торнадоподобном вихре предпринята в [29]. Вихри генерировались при горении спирта, налитого в цилиндрический сосуд высотой 9 см, диаметром 12 см, вращающийся вокруг оси симметрии. Начальная глубина жидкости 3 см. Визуальные наблюдения показали, что при частоте вращения сосуда в диапазоне 1,5–4 Гц пламя принимает колоннообразную форму и возникает вихревая огненная структура. Генерируемые огненные вихри не были строго вертикальными и неподвижными в пространстве. Они изгибались и совершали небольшие нерегулярные перемещения вокруг оси симметрии. Высота видимого столба пламени пульсирует со временем в диапазоне примерно от 30 до 40 см. Было проведено измерение полей скоростей в нескольких сечениях по высоте, перпендикулярных к оси симметрии, с использованием методики PIV. В качестве частиц-трассеров использовались стеклянные микросферы диаметром примерно 20 мкм и средней плотностью 0,2 г/см<sup>3</sup>. Измерение скоростей показало, что вихрь несимметричен относительно оси, имеются ядро вихря, где вращение происходит по закону, близкому к твердотельному, и область внешнего течения, где вращательная (тангенциальная) компонента скорости убывает. Максимум скорости  $U_\varphi = 1,5 \pm 0,2$  м/с достигался на границе ядра диаметром  $d = 36 \pm 9$  мм.

Детальные экспериментальные исследования квазистационарных огненных вихрей отражены в [30–33]. Изучаемые огненные вихри генерировались тремя независимыми способами: 1) вращением нижнего основания подложки с горючими материалами; 2) закруткой воздушного потока лопастями, располагаемыми над неподвижной емкостью с горючим; 3) использованием бокового воздушного потока, направляемого перпендикулярно оси симметрии пламени.

Модельные огненные вихри формировались при сжигании: 1) сырой нефти для моделирования огнен-

ных смерчей пожаров на нефтехранилищах; 2) лесных горючих материалов (опада хвои сосны, кедр, ели, лиственцы) для моделирования огненных смерчей при лесных пожарах; 3) фрагментов деревянных зданий (крупно- и мелкомасштабных) для моделирования огненных смерчей при крупных пожарах в лесах, городах и населенных пунктах. В процессе проведения экспериментов после образования огненного вихря определялись его параметры: геометрические размеры (радиус, максимальная высота) по фотографиям вихря; температура газа на оси с помощью хромель-алюмелевой термопары; плотность теплового потока экспоненциальным методом с помощью датчика теплового потока, закрепленного на теплоизолированной рукоятке; вертикальная и тангенциальная компоненты скорости с помощью трубки Пито (метод измерения разности давлений навстречу потоку и перпендикулярно ему), а также фоторегистрацией траекторий движения мелкодисперсных частиц алюминия, вводимых в поток в направлении тангенциальной скорости вращения; радиальная скорость газа термоанемометрическим методом.

Анализ результатов измерений показал, что плотность теплового потока слабо зависит от типа горючих материалов. Плотность теплового потока в огненном вихре на 13% выше соответствующей характеристики при свободно горящей поверхности вследствие увеличения конвективной составляющей теплового потока при формировании вихря.

Для обобщения полученных результатов использовались безразмерные критерии  $F$  (критерий вращательного движения частиц) и  $Os$  (критерий Остроградского), определяемые как

$$F = \nu H U_z / \Gamma^2, \quad \Gamma = 2\pi r U_\phi \quad (19)$$

$$Os = \frac{Q(2r)^2}{\lambda T_0}, \quad Q = \int_0^r q dy, \quad (20)$$

где:  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости газа в вихре;  $H$  — высота огненного вихря;  $U_z$  — осевая компонента скорости;  $\Gamma$  — циркуляция скорости;  $r$  — радиус вихря;  $U_\phi$  — тангенциальная компонента скорости;  $Q$  — объемное тепловыделение;  $S$  — площадь поверхности горения;  $q$  — измеренная плотность теплового потока на определенной высоте ( $z = 1$  см);  $\lambda$  — теплопроводность среды;  $T_0$  — температура газа на оси вихря.

Для расчета безразмерных критериев  $F$  и  $Os$  использованы результаты измерения высоты смерча  $H = 0,4 - 1,0$  м; температуры  $T_0 = 900 - 1200$  К, скоростей  $U_z$  и  $U_\phi$  на высоте  $z = 0,1$  м (высота начала формирования вихря). Рассчитанные значения критери-

ев при различных способах закрутки изменялись в диапазонах  $F = 0,67 - 0,76$  и  $Os = 7,96 - 9,34$ . Близость значений критериев подобия для разных способов формирования огненных вихрей позволила сделать важный вывод о независимости процесса формирования огненных вихрей от способа закрутки газового потока.

В [34] описано простое портативное твердотопливное устройство, пригодное для генерации огненных вихрей и изучения их динамики в лабораторных условиях и на открытом полигоне. Устройство с ручным приводом было сконструировано на базе безынерционной катушки для рыболовного спиннинга, с которой была удалена шпуля. При испытаниях устройства на нем соосно закрепляли таблетку уротропина, которую затем поджигали (рис. 6, а). Высота пламени в отсутствие вращения изменялась в процессе горения от 2 до 7 см. Пламя имело неправильную форму, сильно зависящую от направления и силы ветра (при испытаниях на открытом полигоне). При вращении рукоятки со скоростью 0,1–1 об./с пламя принимало форму скрученного столба и увеличивалось по высоте до ~20 см. Так происходила генерация огненного вихря (рис. 6, б). Его форма была близка к цилиндрической либо конусообразной, а границы четко очерчены. Диаметр вихря составлял 1,5–2,5 см (почти вдвое меньше диаметра таблетки). Было обнаружено, что вихрь более устойчив к воздействию ветра, чем обычное пламя без вращения: ветер лишь отклоняет вихрь от оси, не разрушая его (рис. 6в).

*Особенности генерации огненных вихрей.* В [35–37] экспериментально изучен процесс перехода от обычного пламени в емкости к огненному вихрю. В [35] приведены результаты экспериментального исследования скорости горения жидких топлив при формировании огненных вихрей. Были сделаны следующие выводы: 1) увеличение скорости горения в огненных вихрях по сравнению с обычными пламенами явля-

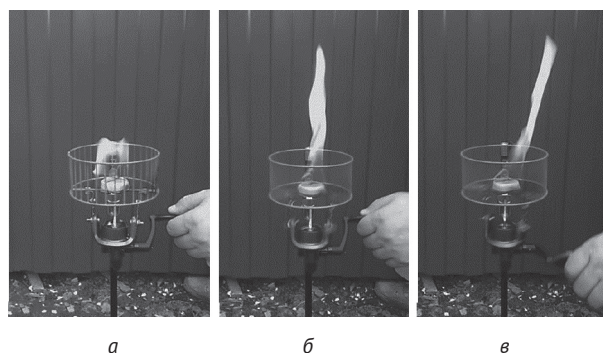


Рис. 6. Горение таблетки уротропина в устройстве: а — свободное горение в неподвижном состоянии; б — огненный вихрь во вращающемся устройстве; в — отклонение от вертикали огненного вихря ветром со скоростью ~1,5 м/с

ется результатом интенсификации конвективного тепло- и массообмена в пограничном слое втекающего потока над поверхностью жидкого горючего; 2) в пограничном слое втекающего потока отчетливо выделяются две области – внешняя (с горением) и внутренняя (без горения), причем первая характеризуется значительно большей скоростью испарения топлива; 3) высота как ламинарных, так и турбулентных огненных вихрей, генерируемых над емкостями с жидкими топливами, пропорциональна значениям окружающей циркуляции.

В [36] с использованием описанной выше установки (см. [19, 20] и рис. 4) исследованы крупномасштабные трехмерные неустойчивости, включая вращение и прецессии наклонного пламени в течение переходного процесса от обычного пламени к квазистационарному огненному вихрю. Проведенные эксперименты выявили сильную зависимость времени формирования огненного вихря, отсчитываемого с момента поджига топлива, от размера (диаметра) емкости с топливом. Максимально быстрое образование вихря (50 с) происходило при горении топлива в емкости большого размера ( $D = 55$  см), а при использовании самой маленькой емкости ( $D = 10$  см) для генерации вихря требовалось существенно больше времени (800 с).

Результаты экспериментов позволили выявить следующие особенности процесса генерации огненных вихрей: 1) перед формированием огненного вихря пламя вращается вокруг геометрической оси симметрии с увеличивающейся угловой скоростью вплоть до достижения критической частоты вращения, необходимой для генерации огненного вихря; 2) скорость входящего потока флуктуирует синхронно с вращением пламени на начальной стадии, которая заканчивается в момент начала прецессии; 3) в квазистационарном состоянии осредненные окружающие циркуляции и осредненные входные скорости являются линейными функциями размеров топливных емкостей; 4) частота вращения и прецессии пламени линейно зависит от осредненной скорости входящего потока – числа Струхала равны  $Sh = 0,42$  и  $Sh = 0,80$  соответственно; 5) направления вращения пламени и прецессии пламени всегда совпадают; 6) вращение пламени вызывается периодическими пульсациями входящего потока воздуха, в то время как прецессия пламени возникает вследствие существования внешней рециркуляционной зоны в огненных вихрях.

В [37] при проведении экспериментов использовалась установка, схожая с описанной в [12]. Газовая горелка (топливо — пропан) диаметром 5 см устанавливалась в центре стационарного стола. Сеточный вращающийся экран (диаметр 50 см, высота 1 м) был

выполнен из нержавеющей стали. Скорость вращения могла изменяться в диапазоне от 0 до 120 рад/мин. В результате экспериментов были сделаны следующие выводы: 1) если угловая скорость вращения не превышала некоторого критического значения, то первоначально вертикально ориентированное свободно-конвективное пламя отклонялось на некоторый угол вследствие действия силы Кориолиса; 2) угол отклонения пламени от вертикальной оси увеличивался с ростом скорости вращения экрана, достигая  $60^\circ$ ; 3) отклоненное пламя вращается относительно центральной оси установки со скоростью, равной скорости вращения экрана; 4) при достижении критической скорости вращения экрана наклонное пламя опять становилось вертикальным и происходило окончательное формирование огненного вихря; 5) частота пульсаций отклоненного пламени была выше частоты пульсаций обычного пламени без вращения экрана.

В [38] изучены особенности формирования наклонных огненных вихрей. Отмечается, что основные физические явления, приводящие к образованию атмосферных вихрей (пыльных дьяволов, торнадо и т.п.), очень схожи между собой. Так, вследствие сильного влияния эффектов плавучести на процесс формирования и распространения указанных вихревых структур их оси расположены почти вертикально. Тем не менее в ряде случаев при пожарах (например, 28 октября 2007 г. в Калифорнии) наблюдалось формирование огненных вихрей с наклонными осями, для которых плавучесть не могла быть основным источником образования и существования. Для экспериментов по генерации наклонных огненных вихрей использовалась установка типа фиксированного каркаса, которая располагалась на подставке с регулируемым углом наклона ( $0-30^\circ$ ) относительно горизонтальной поверхности [14, 18]. В итоге при сжигании различных жидких топлив (метанола, этанола, пропанола) были получены огненные вихри с наклонными относительно горизонтальной поверхности осями, качественно повторяющие вид наблюдаемых огненных вихревых структур, имевших место во время пожара в Калифорнии (рис. 7, см. обл., с. 3). Было показано, что пламя может становиться длиннее без увеличения скорости горения. Высота пламени в экспериментах изменялась путем блокирования верхней части прорезей для входа воздуха. Было найдено, что длина пламени не зависит от угла наклона для данной скорости горения. Таким образом, был сделан вывод, что параметры огненных вихрей в исследованном случае определяются в значительной степени интенсивностью вращения и процессом вовлечения воздуха, нежели эффектом плавучести.



В [39] приведены результаты модельных экспериментов по изучению возможности генерации огненных вихрей вследствие взаимодействия линейных фронтов пламени различной конфигурации и сносящего внешнего воздушного потока. Мотивацией для этого исследования послужил огненный вихрь, наблюдавшийся во время лесного пожара в Бразилии в 2010 г. Указанный огненный вихрь возник над узкой, но длинной линией огня и двигался вдоль этой линии приблизительно с постоянной скоростью. Он образовался вследствие взаимодействия прямолинейного фронта огня и фонового ветра, так как поблизости не было ни гористой местности, ни высоких зданий, ни даже деревьев.

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), а также нагреваемые никель-хромовые полоски той же конфигурации. Скорость горизонтального потока воздуха варьировала в диапазоне от 0,05 до 0,4 м/с. Генератор дыма использовался для визуализации течения. На рис. 8 показаны одна из использованных конфигураций желобов с топливом и пример образовавшегося огненного вихря, двигающегося вниз по течению, параллельно сносящему потоку воздуха. Диаметр генерируемых вихрей был приблизительно равен ширине использовавшихся для создания пламени желобов (2 см), а высота достигала 50 см и даже более в зависимости от конкретных экспериментальных условий.

Полученные результаты подтвердили данные о существовании некоторого критического значения скорости ветра, при котором образуется огненный вихрь [40–42]. Если скорость ветра ниже или выше этого значения, то генерация огненных вихрей не происходит

или образующиеся вихревые структуры имеют низкую интенсивность. В [39] все типы огненных вихрей образовывались в диапазоне скоростей между 0,15 и 0,35 м/с. Показано, что значение критической скорости  $U_{cr}$  пропорционально (и одного порядка) скорости генерируемого вследствие наличия пламени восходящего потока, и определяется следующим образом:

$$U_{cr} \sim (gH)^{1/2}, \quad (21)$$

где:  $g$  — ускорение свободного падения;  $H$  — высота пламени в отсутствие огненного вихря (вихрь приводит к росту пламени в локальной области генерации вихря).

Эксперименты показали, что один из ключевых параметров — длина линии огня — важен для генерации огненного вихря, а угол между линией огня и сносящим потоком воздуха не оказывает большого влияния на процесс формирования вихря.

Оценки критической скорости бокового ветра. Многочисленные исследования показали важность присутствия бокового ветра для процесса генерации огненных вихрей. В [41] выполнен анализ, позволяющий проводить оценки скорости бокового ветра, при котором образуются наиболее интенсивные огненные вихри. Сначала критическая скорость  $U_{cr}$  была представлена в виде функции всех возможных физических величин, оказывающих влияние на процесс формирования вихрей, в виде

$$U_{cr} = f_1(c_p, L, \bar{Q}, \rho_0, \Delta\rho, T_0, \Delta T, g), \quad (22)$$

где:  $c_p$  — теплоемкость воздуха;  $L$  — горизонтальный масштаб пламени;  $\bar{Q}$  — количество теплоты, выделяющееся в единицу времени с единицы площади

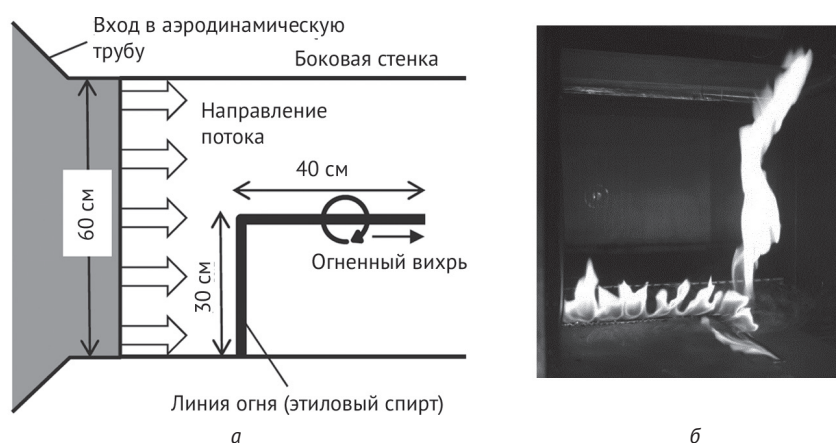


Рис. 8. Одна из конфигураций (L-образная) использованного в экспериментах линейного пламени для генерации вихрей (а) и типичный движущийся огненный вихрь (б), зафиксированный для показанной конфигурации пламени в сносящем потоке воздуха. Ширина линии огня 2 см; скорость бокового ветра 0,25 м/с. Поток направлен перпендикулярно плоскости изображения навстречу наблюдателю

области горения;  $\rho_0$  — плотность воздуха при температуре окружающей среды;  $\Delta\rho$  — разница плотности при температуре пламени и температуре окружающей среды;  $T_0$  — температура окружающей среды;  $\Delta T$  — разница температуры пламени и температуры окружающей среды;  $g$  — гравитационное ускорение.

При записи (22) было сделано шесть допущений:

- 1) количество теплоты, уходящее в землю (основание), пренебрежимо мало по сравнению с теплотой, генерируемой вследствие реакции горения [43];
- 2) сила вязкости намного меньше сил инерции и плавучести;
- 3) теплопроводность и массообмен пренебрежимо малы;
- 4) давление принимается постоянным;
- 5) реакции горения протекают с бесконечно высокими скоростями;
- 6) работа, производимая силой плавучести, пренебрежимо мала.

Применяя  $\pi$ -теорему анализа размерностей [44, 45], из (22) было получено:

$$\frac{U_{cr}}{(gL)^{1/2}} = f_2\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}, \frac{\Delta T}{T_0}, \frac{\bar{Q}}{c_p\rho_0\Delta T(gL)^{1/2}}\right) \equiv f_2(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3), \quad (23)$$

где  $\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3$  — безразмерные параметры.

Учитывая, что  $m' = \bar{Q}/(c_p \Delta T)$ , где  $m'$  — расход топлива с единицы площади области горения в единицу времени, безразмерный параметр  $\Pi_3$  равен квадратному корню из «топливного» числа Фруда  $Fr_f$ , определяемому как

$$Fr_f = \frac{m'^2}{\rho_0^2 g L}. \quad (24)$$

В обычных пламенах безразмерные параметры  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  могут быть приняты постоянными. Тогда (21) можно переписать в следующей форме:

$$\frac{U_{cr}}{(gL)^{1/2}} = f_3(Fr_f^{1/2}). \quad (25)$$

Далее была предпринята попытка обобщить большой массив данных как для модельных лабораторных вихрей, размер которых не превышает 1 м, так и для реальных огненных вихрей, размер которых может быть более 1 км [41]. В результате была найдена зависимость безразмерной критической скорости от  $Fr_f^{1/2}$ , вокруг которой удовлетворительным образом группируются все имеющиеся данные [16, 41, 43, 46–49], в виде

$$\frac{U_{cr}}{(gL)^{1/2}} \sim Fr_f^{n/2}, \quad n \approx 0,3. \quad (26)$$

С учетом хорошо известного соотношения  $H/L \sim Fr_f^n$  ( $H$  — высота пламени и  $1/5 < n < 1/3$ ) [50, 51] и выражения  $U_b \sim (gH)^{1/2}$  [51], где  $U_b$  — скорость на вершине пламени вследствие плавучести, полученное уравнение (26) подтверждает ранее сделанное в [40] утверждение о пропорциональности  $U_{cr}$  и  $U_b$ .

*Оценки высоты пламени.* Эта одна из основных характеристик пламени, которая в случае формирования огненного вихря может существенно возрастать. Вихрь Бюргерса характеризуется двумя основными параметрами — радиусом ядра  $R$  (область твердотельного вращения) и значением циркуляции  $\Gamma$ . Тогда следуя (20), высота пламени  $H$  будет функцией следующих параметров:

$$H = \varphi_1(c_p, L, \bar{Q}, \rho_0, \Delta\rho, T_0, \Delta T, g, R, \Gamma). \quad (27)$$

Применяя метод анализа размерностей, из (27) можно получить, как в [41]:

$$\frac{H}{L} = \varphi_2\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_0}, \frac{\Delta T}{T_0}, \frac{\bar{Q}}{c_p\rho_0\Delta T(gL)^{1/2}}, \frac{R}{L}, \frac{\Gamma^2}{gL^3}\right) \equiv \varphi_2(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5). \quad (28)$$

Как и ранее, безразмерные параметры  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  — постоянные величины в обычных пламенах, а  $\Pi_4$  имеет порядок 1. Таким образом, безразмерная высота пламени зависит в основном от параметров  $\Pi_3$  и  $\Pi_5$ . Если  $\Gamma \gg (gL^3)^{1/2}$ , то можно предположить что безразмерный параметр  $\Pi_5$  доминирующий. Из баланса (равенства) тангенциальной и скорости вследствие плавучести следует

$$\frac{\Gamma}{W} \sim (gH)^{1/2}, \quad (29)$$

где  $W$  — ширина пламени.

Ширина пламен может быть оценена, как в [50]

$$W \sim H \quad \text{для небольших пламен}, \quad (30)$$

$$W \sim L \quad \text{для больших пламен}. \quad (31)$$

Допуская, что (30) и (31) выполняются и в случае огненных вихрей, (29)–(31) приводят к следующим соотношениям:

$$\frac{H}{L} \sim \left( \frac{\Gamma^2}{gL^3} \right)^{1/3} \text{ для небольших пламен,} \quad (32)$$

$$\frac{H}{L} \sim \frac{\Gamma^2}{gL^3} \text{ для больших пламен.} \quad (33)$$

Соотношения (32) и (33) могут быть переписаны в виде одного выражения:

$$\frac{H}{L} \sim \left( \frac{\Gamma^2}{gL^3} \right)^n, \quad 1/3 < n < 1 \quad (34)$$

Огненные вихри при пожарах в замкнутых пространствах. В современных промышленных строениях, как правило, имеется значительное количество помещений с отверстиями в потолках, стенах, которые могут способствовать формированию вращающихся пламен при пожарах. Для эффективного предотвращения возгораний в промышленных зданиях и максимального снижения ущерба из-за пожаров необходимо изучать условия возникновения вращающихся пламен (огненных вихрей) при пожарах в замкнутых пространствах.

В [52] проведен простой теоретический анализ и получены результаты экспериментального исследования особенностей образования вращающегося пламени в условиях пожара в однокомнатном помещении при наличии потолочного отверстия и отверстия в стене (открытой двери). С целью поиска определяющих параметров были использованы уравнение теплового баланса из [53] и соотношения для скорости тепловыделения и расхода горячих газов через потолочное отверстие из [54]. Акцент делался на поиске некоторого комплексного геометрического параметра  $X$ , определяющего условия формирования огненных вихрей и записываемого как

$$X = f(A_c, A_p, A_f), \quad (35)$$

где  $A_c, A_p, A_f$  – площадь отверстия в потолке, дверного проема и возгорания (емкости с топливом) соответственно.

С учетом угла поворота двери эффективная площадь подсоса воздуха  $A_i$  в помещение определяется как

$$A_i = wh \sin \Theta, \quad (36)$$

где:  $w$  – ширина двери,  $h$  – высота двери,  $\Theta$  – угол поворота двери.

В результате существенных упрощений (отбрасывания всех многочисленных физических величин, кроме геометрических) получено следующее соотно-

шение для модификации комплексного геометрического параметра  $X'$ , учитывающего особенности геометрии помещения:

$$X' = f(A_c, A_i, A_f, A_i) = \frac{A_i \sqrt{A_f^2 A_i^2 + A_c^4} - A_f A_i^2}{A_c^2 wh \sin \Theta}. \quad (37)$$

Отметим, что определяющим угловым параметром является не угол поворота двери, а угол ориентации двери относительно емкости с топливом:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{\sqrt{A_f}}{2d} - \Theta, \quad (38)$$

где:  $\varphi$  – угол между дверью и линией, проходящей через ось симметрии двери и через край емкости с топливом;  $d$  – расстояние между дверью и емкостью с топливом.

В [52] также описаны эксперименты по горению в модельной комнате длиной 0,68 м, шириной 0,42 м и высотой 0,42 м. Во время проведения экспериментов основные геометрические параметры варьировались в следующих диапазонах:  $A_c = 196 - 841 \text{ см}^2$ ,  $A_f = 25 - 225 \text{ см}^2$ ,  $d = 17,5 - 52,5 \text{ см}$ ,  $w = 9 - 18,5 \text{ см}$ ,  $\Theta = 15^\circ - 45^\circ$ . В результате были выявлены режимы с образованием и без образования огненных вихрей (рис. 9, см. обл., с. 3). Например, при полностью открытой двери ( $\Theta = 90^\circ$ ) генерация огненных вихрей не наблюдалась (рис. 9а). На рис. 10 приведены данные обобщения экспериментальных результатов в координатах  $X' = f(\varphi)$ . Видно, что в зависимости от значений  $X'$  и  $\varphi$  отчетливо выделяются две области (с генерацией огненных вихрей и без нее).

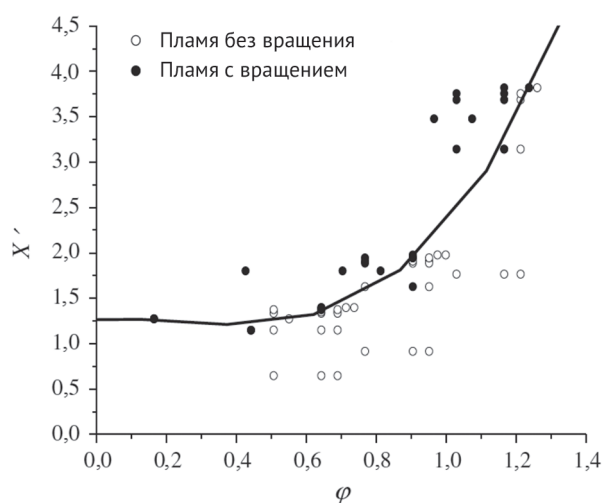


Рис. 10. Зависимость модификации комплексного геометрического параметра  $X'$  от угла ориентации двери  $\varphi$  относительно емкости с топливом

## 5. Исследование свободных нестационарных огненных вихрей

Целью всех описанных выше экспериментальных работ было получить стационарные (квазистационарные) огненные вихревые структуры с использованием тех или иных способов принудительной закрутки. При такой постановке целый ряд принципиальных фундаментальных задач (генерация, устойчивость, управление и т.п.) изучения огненных вихрей оставался вне рассмотрения. Имеется лишь несколько работ, авторы которых исследовали особенности генерации свободных (неограниченных стенками) нестационарных (квазистационарных) огненных вихрей [55–57]. В [55, 56] изучены возможности генерации огненных вихрей над емкостью с топливом, окруженной огненными «стенками» различной конфигурации (рис. 11). В экспериментах зафиксирована генерация огненных вихрей вследствие циркуляции воздуха из-за наличия зазоров в огненных «стенках», формируемых внешними пламенами (рис. 11, б).

Авторами [57] создана экспериментальная установка оригинальной конструкции, не имеющая внешних стенок (рис. 12). Вместо обычных стенок использована специальная воздушная завеса и созданы условия для тангенциального притока воздуха в зону горения, что обеспечивало генерацию квазистационарных огненных вихрей. В результате измерений были получены подробные данные о скорости горения, высоте пламени, распределению температур и радиационных характеристиках.

В экспериментальных исследованиях предпринята попытка физического моделирования свободных существенно нестационарных огненных вихрей без использования механических закручивающих устройств и организации тангенциального притока воздуха в зону горения [58, 59].

Для генерации нестационарных огненных вихрей использовалась простая установка, аналогичная использованной для генерации свободных нестационарных воздушных вихрей (например, см. [60–62]). Схема

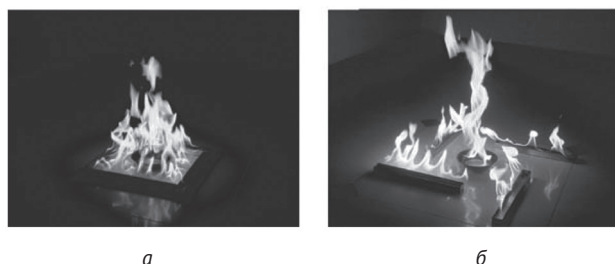


Рис. 11. Фотографии пламени над центральной емкостью при различных окружающих условиях:  
а – обычное пламя над емкостью с топливом, окруженной замкнутыми огненными «стенками»; б – сформированный вихрь в емкости с топливом, окруженной разомкнутыми огненными «стенками»

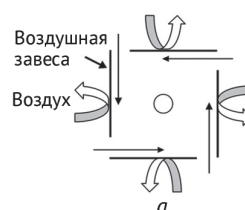


Рис. 12. Схема воздушных потоков, формирующих огненный вихрь, и фотография экспериментальной установки:  
а – схематическое изображение потоков воздуха (вид сверху); б – сформированный вихрь

установки показана на рис. 13. Она располагалась в комнате с полом 1 площадью 6×6 м<sup>2</sup>, 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 (гексаметилентетрамин, химическая формула C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>N<sub>4</sub>). Масса каждой таблетки 21 г (диаметр 40 мм). Теплота сгорания уротропина 30 МДж/кг.

Эксперименты проводились для разного количества горючего (числа таблеток). Первый, второй и третий режимы соответствовали случаям горения 1, 7 и 19 таблеток соответственно. Так, для режима 3 в центре подстилающей поверхности располагались 19 таблеток, формируя вписанный в окружность (диаметр

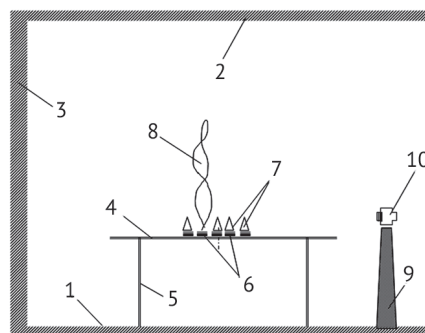


Рис. 13. Схема простой экспериментальной установки для генерации свободных нестационарных огненных вихрей

300 мм) шестиугольник. При проведении эксперимента они поджигались, формируя пламена 7 (рис. 13). 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 простая экспериментальная установка позволяет осуществлять сжигание твердого горючего с выделением контролируемого количества теплоты, а также фотосъемку некоторых особенностей процесса сгорания таблеток и генерации огненных вихрей (рис. 14).

Эксперименты выявили сильную зависимость высоты пламени (и температуры воздуха) от времени, связанную с существенной нестационарностью процесса горения таблеток горючего. Сначала они разгораются — это приводит к росту высоты пламени. Затем следует непродолжительный период относительной стабилизации (высота пламени изменяется слабо), вскоре начинается достаточно продолжительный период их затухания. Следует заметить, что процесс горения обладает и собственной высокочастотной нестационарностью (неустойчивостью). Образующиеся (наблюдаемые) вихревые структуры также существенно нестационарны и характеризуются относительно небольшим временем жизни и пространственно-временной нестабильностью параметров (высота, диаметр, характерная скорость и др.).

В процессе горения таблеток наблюдалась генерация огненных вихревых структур, высота которых, как правило, значительно (до 2–3 раз) превосходила среднеинтегральную высоту фронта пламени над областью расположения горючего (рис. 14, б). При этом признаком возникновения огненных вихревых структур было появление винтовых траекторий у нагретых частиц продуктов сгорания.

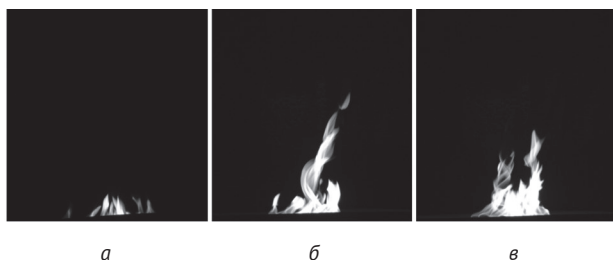


Рис. 14. Типичные фотографии процесса горения твердого топлива (уротропина), режим 3:  
а — обычное горение таблеток; б — зафиксированный огненный вихрь; в — зафиксированные два огненных вихря

Многочисленные повторения опытов позволили сделать следующие заключения. Образование огненных вихревых структур наблюдалось лишь при сжигании 7 и 19 таблеток горючего, т.е. при работе в режимах 2 и 3. Количество и размеры генерируемых вихрей были значительно больше при работе в режиме 3, который и был выбран в качестве основного.

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:

- временном диапазоне образования огненных вихревых структур;
- области возникновения огненных вихрей;
- количестве наблюдаемых огненных вихрей за один эксперимент;
- времени жизни огненных вихревых структур, высоте и диаметре огненных вихрей.

Многочисленные повторения экспериментов (режим 3) позволило сделать несколько важных заключений. Первые огненные вихри начинали образовываться через 4 мин, а самые последние — через 12 мин после поджигания таблеток. Генерация огненных 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 (см. рис. 14, в). Время жизни подавляющего большинства генерируемых вихрей составляло от 1 до 5 с; наибольшая высота огненных вихрей достигала 0,7 м, а их максимальный диаметр — 0,05 м.

Процесс формирования огненного вихря, вероятно, 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.

В [58, 59] показана принципиальная возможность физического моделирования 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.

## 6. Выводы

Проведен обзор экспериментальных работ, посвященных изучению генерации и динамики концентрированных огненных вихрей. Рассмотрены основные характеристики стационарных и нестационарных, а также свободных и ограниченных стенками огненных вихрей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Musham H.A.* The Great Chicago fire, Papers in Illinois State History and Transaction, 1941. — pp. 69–189.
2. *Gess D., Lutz W.*, Fire Storm in Peshtigo: A Town, Its People and the Deadliest Fire in American History, Henry Holt Publishing, 2002.
3. *Soma S., Saito K.*, A Study of Fire Whirl on Mass Fires Using Scaling Models, in: Proc. First Int. Symp. on Scale Modeling, JSME, Tokyo, Japan, 1988.
4. *Forthofer J.M., Goodrick S.L.* Review of Vortices in Wildland Fire // J. Combust. — 2011. — Article ID 984363.
5. *Ebert C.H.V.* Hamburg's Fire Storm Weather // NFPA Quarterly. 1963. V. 56. P. 253–260.
6. *Hissong J.* Whirlwinds at Oil-Tank Fire, San Luis Obispo, California // Monthly Weather Review. 1926. V. 54. P. 161–163.
7. *Goens D.W.* Fire Whirls. NOAA Technical Memorandum NWS WR-129, 1978.
8. *Chuah K.H., Kuwana K., Saito K.* Modeling a Fire Whirl Generated over a 5-cm-Diameter Methanol Pool Fire // Combust. Flame. 2009. V. 156. P. 1828–1833.
9. *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.
10. *Burke S.P., Schumann T.E.W.* Diffusion Flames // Ind. Eng. Chem. — 1928. — V. 20. — P. 998–1004.
11. *Roper F.G.* The Prediction of Laminar Jet Diffusion Flame Sizes: Part 1. Theoretical Model // Combust. Flame. — 1977. — V. 29. — P. 219–226.
12. *Emmons H.W., Ying S.J.* The Fire Whirl // Proc. Combust. Inst. 1967. V. 11. P. 475–488.
13. *Byram G.M., Martin R.E.* Fire Whirlwinds in the Laboratory // Fire Control Notes. 1962. V. 33. P. 13–17.
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. *Byram G.M., Martin R.E.* The Modeling of Fire Whirlwinds // Forest Science. 1970. V. 16. № 4. P. 386–399.
16. *Soma S., Saito K.* Reconstruction of Fire Whirls Using Scale Models // Combust. Flame. 1991. V. 86. P. 269–284.
17. *Satoh K., Yang K.T.* Experimental Observations of Swirling Fires // Proc. of ASME Heat Transfer Division. 1996. HTD-V.335. № 4. P. 393–400.
18. *Satoh K., Yang K.T.* Simulation of Swirling Fires Controlled by Channeled Self-Generated Entrainment Flows // Fire Safety Science. Proc. of the 5th Int. Symp. 1997. P. 201–212.
19. *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.
20. *Zhou K., Liu N., Lozano J.S., Shan Y., Yao B., Satoh K.* Effect of Flow Circulation on Combustion Dynamics of Fire Whirl // Proc. Combust. Inst. 2013. V. 34. P. 2617–2624.
21. *Tarifa C.S.* Open Fires. Instituto Nacional de Tecnica Aeroespacial Esteban Teradas. Madrid, 1967.
22. *Kung H.C., Stavrianidis P.* Buoyant Plumes of Large-Scale Pool Fires // Proc. Combust. Inst. 1982. V. 19. P. 905–912.
23. *Klassen M.E., Gore J.P.* Structure and Radiation Properties of Pool Fires. In: NIST GCR 94–651, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1994.
24. *Koseki H., Yumoto T.* Air Entrainment and Thermal Radiation from Heptane Pool Fires // Fire Technology. 1988. V. 24. P. 33–47.
25. *Koseki H.* Combustion Properties of Large Liquid Pool Fires // Fire Technology. 1989. V. 25. P. 241–255.
26. *Blinov V.I., Khudiakov G.N.* Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids // Fire Res. Abstr. Rev. 1959. V. 1. № 2. — P. 41–44.
27. *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.
28. *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.
29. *Akhmetov D.G., Gavrilov N.V., Nikulin V.V.* Flow Structure in a Fire Tornado-Like Vortex // Doklady Physics. 2007. V. 52. № 11. P. 592–595.
30. *Grishin A.M., Golovanov A.N., Sukov Y.V.* Physical Modeling of Firestorms // Doklady Physics. 2004. V. 49. № 3. P. 191–193.
31. *Grishin A.M., Golovanov A.N., Kolesnikov A.A., Strokatov A.A., Tsvyk R.S.* Experimental Study of Thermal and Fire Tornados // Doklady Physics. 2005. V. 50. № 2. P. 66–68.
32. *Гришин А.М., Рейно В.В., Сазанович В.М., Цвык Р.Ш., Шерстобитов М.В.* Экспериментальные исследования огненных смерчей // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 8. С. 158–163. (Grishin A.M., Reino V.V., Sazanovich V.M., Tsvyk R.Sh., Sherstobitov M.V. Experimental Study of Fire Tornado // Atmospheric and Oceanic Optics. 2008. V. 21. № 2. P. 136–141.)
33. *Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В., Цвык Р.Ш.* Физическое моделирование огненных смерчей // Оптика атмосферы и океана. 2008. Т. 21. № 9. С. 766–772. (Grishin A.M., Golovanov A.N., Sukov Ya.V., Tsvyk R.Sh., Physical

- modeling of fire tornados // Atmospheric and Oceanic Optics. 2008. V. 21. № 9. P. 661–667.)
34. Vyalikh D.V., Dubinov A.E., Kolotkov D.Yu., Sadovoi S.A., Sadchikov E.A. A Portable Hand-Driven Solid-Fuel Device for Generating Fire Whirls // Instruments and Experimental Techniques. 2013. V. 56. № 3. — P. 347–348.
  35. Lei J., Liu N., Zhang L., Deng Z., Akafuah N.K., Li T., Saito K., Satoh K. Burning Rates of Liquid Fuels in Fire Whirls // Combust. Flame. 2012. V. 159. P. 2104–2114.
  36. Lei J., Liu N., Lozano J.S., Zhang L., Deng Z., Satoh K. Experimental Research on Flame Revolution and Precession of Fire Whirls // Proc. Combust. Inst. 2013. V. 34. P. 2607–2615.
  37. ei J., Liu N., Satoh K. Buoyant Pool Fires under Imposed Circulations before the Formation of Fire Whirls // Proc. Combust. Inst. — 2015. — V. 35. — P. 2503–2510.
  38. Chuah K.H., Kuwana K., Saito K., Williams F.A. Inclined Fire Whirls // Proc. Combust. Inst. 2011. V. 33. P. 2417–2424.
  39. 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.
  40. Kuwana K., Sekimoto K., Saito K., Williams F.A., Hayashi Y., Masuda H. Can We Predict the Occurrence of Extreme Fire Whirls? // AIAA J. 2007. V. 45. P. 16–19.
  41. Kuwana K., Sekimoto K., Saito K., Williams F.A. Scaling Fire Whirls // Fire Safety Journal. 2008. V. 43. P. 252–257.
  42. Chen Z., Satoh K., Wen J., Huo R., Hu L. Burning Behavior of Two Adjacent Pool Fires Behind a Building in a Cross-Wind // Fire Safety Journal. 2009. V. 44. P. 989–996.
  43. Emori R.I., Saito K. Model Experiment of Hazardous Forest Fire Whirl // Fire Technology. 1982. V. 18. № 4. P. 319–327.
  44. Buckingham E. On Physically Similar Systems: Illustrations of the Use of Dimensional Equations // Phys. Rev. 1914. V. 4. P. 345–376.
  45. Emori R.I., Saito K., Sekimoto K. Scale Models in Engineering: Its Theory and Applications. Third ed., Gyho-do, Tokyo, Japan, 2000.
  46. Ebert C.H.V. The Meteorological Factor in the Hamburg Fire Storm // Weatherwise. 1963. V. 16. P. 70–75.
  47. Lee S.L., Otto F.W. Gross Vortex Activities in a Simple Simulated Urban Fire // Proc. Combust. Inst. 1974. V. 15. P. 157–162.
  48. Church C.R., Snow J.T., Dessens J. Intense Atmospheric Vortices Associated with a 1000 MW Fire // Bull. Am. Meteorol. Soc. 1990. V. 61. P. 682–694.
  49. Dessens J. Man-Made Tornadoes // Nature. — 1962. V. 193. P. 13–14.
  50. Thomas P.H. The Size of Flames from Natural Fires // Proc. Combust. Inst. 1963. V. 9. P. 844–859.
  51. Williams F.A. Combustion Theory: the Fundamental Theory of Chemically Reacting Flow Systems. Benjamin/Cummings Pub. Co., Menlo Park, CA, 1985.
  52. Chen A., Cui X., Wang W. Theoretical Analysis and Experimental Study of Whirling Flames in Enclosure Fires // Fire Technology. 2013. V. 49. P. 827–842.
  53. Mccaffrey B.J., Quintiere J.G., Harkleroad M.F. Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations // Fire Technology. 1981. V. 17. № 2. P. 98–119.
  54. Karlsson B., Quintiere J.G. Enclosure Fire Dynamics. CRC Press, Boca Raton, 2000.
  55. 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.
  56. 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.
  57. Wang P., Liu N., Zhang L., Bai Y., Satoh K. Fire Whirl Experimental Facility with No Enclosure of Solid Walls: Design and Validation // Fire Technology. 2015. V. 51. № 4. P. 951–969.
  58. 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.
  59. 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.
  60. Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N., Gorbachev M.A. Simulation of Free Heat Vortexes: Generation, Stability, Control // High Temperature. 2010. V. 48. № 6. P. 918–925.
  61. Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N. Tornado-Like Gas-Solid Flow // The 6<sup>th</sup> Int. Symp. on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion. AIP Conference Proc. 2010. V. 1207. P. 342–347.
  62. 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.

## REFERENCES

1. Musham H.A. The Great Chicago fire, Papers in Illinois State History and Transaction, 1941. — pp. 69–189.
2. Gess D., Lutz W., Fire Storm in Peshtigo: A Town, Its People and the Deadliest Fire in American History, Henry Holt Publishing, 2002.
3. Soma S., Saito K., A Study of Fire Whirl on Mass Fires Using Scaling Models, in: Proc. First Int. Symp. on Scale Modeling, JSME, Tokyo, Japan, 1988.
4. Forthofer J.M., Goodrick S.L. Review of Vortices in Wildland Fire. J. Combust. — 2011. — Article ID 984363. — 14 pp.
5. Ebert C.H.V. Hamburg's Fire Storm Weather. NFPA Quarterly. — 1963. — V. 56. — P. 253–260.
6. Hissong J. Whirlwinds at Oil-Tank Fire, San Luis Obispo, California. Monthly Weather Review. — 1926. — V. 54. — P. 161–163.

7. Goens D.W. Fire Whirls. NOAA Technical Memorandum NWS WR-129, 1978. — 15 p.
8. Chuah K.H., Kuwana K., Saito K. Modeling a Fire Whirl Generated over a 5-cm-Diameter Methanol Pool Fire. *Combust. Flame.* — 2009. — V. 156. — P. 1828–1833.
9. 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.
10. Burke S.P., Schumann T.E.W. Diffusion Flames. *Ind. Eng. Chem.* — 1928. — V. 20. — P. 998–1004.
11. Roper F.G. The Prediction of Laminar Jet Diffusion Flame Sizes: Part 1. Theoretical Model. *Combust. Flame.* — 1977. — V. 29. — P. 219–226.
12. Emmons H.W., Ying S.J. The Fire Whirl. *Proc. Combust. Inst.* — 1967. — V. 11. — P. 475–488.
13. Byram G.M., Martin R.E. Fire Whirlwinds in the Laboratory. *Fire Control Notes.* — 1962. — V. 33. — P. 13–17.
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. Byram G.M., Martin R.E. The Modeling of Fire Whirlwinds. *Forest Science.* — 1970. — V. 16. — № 4. — P. 386–399.
16. Soma S., Saito K. Reconstruction of Fire Whirls Using Scale Models. *Combust. Flame.* — 1991. — V. 86. — P. 269–284.
17. Satoh K., Yang K.T. Experimental Observations of Swirling Fires. *Proc. of ASME Heat Transfer Division.* — 1996. — HTD-V.335. — № 4. — P. 393–400.
18. Satoh K., Yang K.T. Simulation of Swirling Fires Controlled by Channeled Self-Generated Entrainment Flows. *Fire Safety Science. Proc. of the 5th Int. Symp.* — 1997. — P. 201–212.
19. 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.
20. Zhou K., Liu N., Lozano J.S., Shan Y., Yao B., Satoh K. Effect of Flow Circulation on Combustion Dynamics of Fire Whirl. *Proc. Combust. Inst.* — 2013. — V. 34. — P. 2617–2624.
21. Tarifa C.S. Open Fires. Instituto Nacional de Tecnica Aerospacial Esteban Teradas. Madrid, 1967.
22. Kung H.C., Stavrianidis P. Buoyant Plumes of Large-Scale Pool Fires. *Proc. Combust. Inst.* — 1982. — V. 19. — P. 905–912.
23. Klassen M.E., Gore J.P. Structure and Radiation Properties of Pool Fires. In: NIST GCR 94–651, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1994.
24. Koseki H., Yumoto T. Air Entrainment and Thermal Radiation from Heptane Pool Fires. *Fire Technology.* — 1988. — V. 24. — P. 33–47.
25. Koseki H. Combustion Properties of Large Liquid Pool Fires. *Fire Technology.* — 1989. — V. 25. — P. 241–255.
26. Blinov V.I., Khudiakov G.N. Certain Laws Governing Diffusive Burning of Liquids. *Fire Res. Abstr. Rev.* — 1959. — V. 1. — № 2. — P. 41–44.
27. 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.
28. 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.
29. Akhmetov D.G., Gavrilov N.V., Nikulin V.V. Flow Structure in a Fire Tornado-Like Vortex. *Doklady Physics.* — 2007. — V. 52. — № 11. — P. 592–595.
30. Grishin A.M., Golovanov A.N., Sukov Y.V. Physical Modeling of Firestorms. *Doklady Physics.* — 2004. — V. 49. — № 3. — P. 191–193.
31. Grishin A.M., Golovanov A.N., Kolesnikov A.A., Strokatov A.A., Tsvyk R.S. Experimental Study of Thermal and Fire Tornadoes. *Doklady Physics.* — 2005. — V. 50. — № 2. — P. 66–68.
32. Grishin A.M., Reino V.V., Sazanovich V.M., Tsvyk R.Sh., Sherstobitov M.V. Experimental Study of Fire Tornado. *Atmospheric and Oceanic Optics.* — 2008. — V. 21. — № 2. — P. 136–141.
33. Grishin A.M., Golovanov A.N., Sukov Ya.V., Tsvyk R.Sh., Physical modeling of fire tornadoes. *Atmospheric and Oceanic Optics.* — 2008. — V. 21. — № 9. — P. 661–667.
34. Vyalykh D.V., Dubinov A.E., Kolotkov D.Yu., Sadovoi S.A., Sadchikov E.A. A Portable Hand-Driven Solid-Fuel Device for Generating Fire Whirls. *Instruments and Experimental Techniques.* — 2013. — V. 56. — № 3. — P. 347–348.
35. Lei J., Liu N., Zhang L., Deng Z., Akafuah N.K., Li T., Saito K., Satoh K. Burning Rates of Liquid Fuels in Fire Whirls. *Combust. Flame.* — 2012. — V. 159. — P. 2104–2114.
36. Lei J., Liu N., Lozano J.S., Zhang L., Deng Z., Satoh K. Experimental Research on Flame Revolution and Precession of Fire Whirls. *Proc. Combust. Inst.* — 2013. — V. 34. — P. 2607–2615.
37. Lei J., Liu N., Satoh K. Buoyant Pool Fires under Imposed Circulations before the Formation of Fire Whirls. *Proc. Combust. Inst.* — 2015. — V. 35. — P. 2503–2510.
38. Chuah K.H., Kuwana K., Saito K., Williams F.A. Inclined Fire Whirls. *Proc. Combust. Inst.* — 2011. — V. 33. — P. 2417–2424.
39. 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.
40. Kuwana K., Sekimoto K., Saito K., Williams F.A., Hayashi Y., Masuda H. Can We Predict the Occurrence of Extreme Fire Whirls? *AIAA J.* — 2007. — V. 45. — P. 16–19.
41. Kuwana K., Sekimoto K., Saito K., Williams F.A. Scaling Fire Whirls. *Fire Safety Journal.* — 2008. — V. 43. — P. 252–257.
42. Chen Z., Satoh K., Wen J., Huo R., Hu L. Burning Behavior of Two Adjacent Pool Fires Behind a Building in a Cross-Wind. *Fire Safety Journal.* — 2009. — V. 44. — P. 989–996.
43. Emori R.I., Saito K. Model Experiment of Hazardous Forest Fire Whirl. *Fire Technology.* — 1982. — V. 18. — № 4. — P. 319–327.



44. Buckingham E. On Physically Similar Systems: Illustrations of the Use of Dimensional Equations. *Phys. Rev.* — 1914. — V. 4. — P. 345–376.
45. Emori R.I., Saito K., Sekimoto K. *Scale Models in Engineering: Its Theory and Applications*. Third ed., Gyohdo, Tokyo, Japan, 2000.
46. Ebert C.H.V. The Meteorological Factor in the Hamburg Fire Storm. *Weatherwise.* — 1963. — V. 16. — P. 70–75.
47. Lee S.L., Otto F.W. Gross Vortex Activities in a Simple Simulated Urban Fire. *Proc. Combust. Inst.* — 1974. — V. 15. — P. 157–162.
48. Church C.R., Snow J.T., Dessens J. Intense Atmospheric Vortices Associated with a 1000 MW Fire. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* — 1990. — V. 61. — P. 682–694.
49. Dessens J. Man-Made Tornadoes. *Nature.* — 1962. — V. 193. — P. 13–14.
50. Thomas P.H. The Size of Flames from Natural Fires. *Proc. Combust. Inst.* — 1963. — V. 9. — P. 844–859.
51. Williams F.A. *Combustion Theory: the Fundamental Theory of Chemically Reacting Flow Systems*. Benjamin/Cummings Pub. Co., Menlo Park, CA, 1985.
52. Chen A., Cui X., Wang W. Theoretical Analysis and Experimental Study of Whirling Flames in Enclosure Fires. *Fire Technology.* — 2013. — V. 49. — P. 827–842.
53. Mccaffrey B.J., Quintiere J.G., Harkleroad M.F. Estimating Room Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations. *Fire Technology.* — 1981. — V. 17. — № 2. — P. 98–119.
54. Karlsson B., Quintiere J.G. *Enclosure Fire Dynamics*. CRC Press, Boca Raton, 2000.
55. 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.
56. 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.
57. Wang P., Liu N., Zhang L., Bai Y., Satoh K. Fire Whirl Experimental Facility with No Enclosure of Solid Walls: Design and Validation. *Fire Technology.* — 2015. — V. 51. — № 4. — P. 951–969.
58. 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.
59. 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.
60. Varaksin A.Yu., Romash M.E., Kopeitsev V.N., Gorbachev M.A. Simulation of Free Heat Vortexes: Generation, Stability, Control. *High Temperature.* — 2010. — V. 48. — № 6. — P. 918–925.
61. 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.
62. Varaksin A.Y., Romash M.E., Kopeitsev V.N., Gorbachev M.A. Experimental Study of Wall-Free Non-Stationary Vortexes Generation due to Air Unstable Stratification. *Int. J. Heat Mass Transfer.* — 2012. — V. 55. — P. 6567–6572.

---

## Physical Modeling of Concentrated Fire Whirls (Review)

**A.Yu. Varaksin**, Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department, Bauman Moscow State Technical University; Head of Department of Two-Phase Flows, Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences

*Fire tornadoes are an example of environmental disaster, which causes an enormous damage to the environment and leads to destruction and human fatalities. Fire whirls is a rare but potentially catastrophic form of fire, which dramatically increases the danger of occurring natural and man-made fires and their consequences. They occur in large forest fires, massive fires in cities and major accidents at flammable objects of petrochemical, timber industry, etc. providing full physical modeling of fire whirls is complicated by high risks, costs and complexity of controlling boundary conditions, so the major part of information is obtained through small-scale experiments. The review describes experimental facilities for generating different types of stationary and non-stationary fire vortices and studying their characteristics. We presented and analyzed the results of experiments on the burning rate and the main parameters of fire whirls (height, velocity, temperature). We estimated critical velocity of crosswinds, which yields to generation of the most intensive fire vortices. The features and conditions for the generation of fire whirls during the fires in closed spaces were considered.*

**Keywords:** fire whirls, concentrated vortices, physical modeling.