

ВРАЩЕНИЕ ЕСТЕСТВЕННО-КОНВЕКТИВНОГО ПЛАМЕНИ

АННОТАЦИЯ

Экспериментально и численно исследованы возникновение естественно-конвективного вращающегося пламени и его устойчивость. Работа является продолжением предыдущих исследований авторов, в ходе которых были установлены механизмы и условия самоорганизации естественно-конвективного турбулентного диффузионного пламени, приводящей к формированию огненного вихря над поверхностью жидкого горючего. В данной работе приводятся экспериментальные данные, подтверждающие ранее полученные авторами численные прогнозы о влиянии скорости выгорания жидкого горючего на динамику вращающегося пламени. Кроме того, приведены результаты численного моделирования вращающегося пламени при постоянной (заранее заданной) и переменной (зависящей от воспринятого теплового потока) скорости выгорания жидкого горючего.

1. ВВЕДЕНИЕ

При горении жидких и твёрдых горючих материалов возможно формирование «огненного смерча» над их поверхностью [1]. Возникновение вращающегося естественно-конвективного пламени является эффективным примером самоорганизации

турбулентного диффузионного факела под действием внешних гидродинамических возмущений. Понимание механизмов данного явления и возможность его адекватного моделирования представляет практический интерес для разработки численных моделей пожаров в помещении. В самом деле, вращающееся пламя оказывается гораздо длиннее и часто сопровождается как более высокими скоростями выгорания горючего материала, так и более интенсивным тепловым излучением.

Вращающееся естественно-конвективное пламя возникает под действием внешней циркуляции поля скорости [2]. Закрученные течения и пламена можно классифицировать на основе нескольких факторов: 1) характерного пространственного масштаба; 2) отношения импульса струи горючего к импульсу, порождаемому подъёмной силой (естественно-конвективные или струйные пламена); 3) природы циркуляционного течения (естественно-конвективное или вынужденное, «внешнее» вращение окружающей среды или «внутреннее» вращение струи горючего). Такая классификация приведена в табл. 1.

Таблица 1. Классификация вращающихся течений и пламен

Масштаб	Характерный размер, м	Природа течения	Источник циркуляции		Где встречается	Ссылки	
Очень крупный	$10^5 - 10^6$	Е.К. ¹⁾	Вращение Земли (сила Кориолиса)	В.К. ²⁾	Внешняя	Океанические и атмосферные вихри (циклоны)	[4]
Крупный	$10^2 - 10^4$	Е.К. ¹⁾	Сдвиг ветра в атмосфере	В.К. ²⁾	Внешняя	Торнадо, огненные смерчи и штормы в атмосфере при больших промышленных, лесных и городских пожарах	[5, 6]
Средний	1 – 10	Е.К. ¹⁾	Несимметричный поток входящего воздуха	Е.К. ¹⁾	Внешняя	Пожары в помещениях	[2]
Малый	0.01 – 1	Е.К. ¹⁾	Несимметричный поток входящего воздуха	Е.К. ¹⁾	Внешняя	Лабораторные пламена	[7]
			Вращающийся проникаемый экран	В.К. ²⁾	Внешняя	Лабораторные пламена	[1]
		В.К. ²⁾	Вращающийся проникаемый экран Лопастей завихрителей, входы под углом к оси	В.К. ²⁾	Внутренняя	Камеры сгорания, промышленные топки, двигатели, газовые турбины, котлоагрегаты, распылители	[3, 8]

¹⁾ Естественная конвекция²⁾ Вынужденная конвекция

Как отмечено в [2], отклик естественно-конвективного пламени на действие *внешнего* циркуляционного течения качественно отличается от механизма закрутки пламени в вихревых промышленных горелках, где циркуляция вносится прину-

дительной закруткой реагентов *внутри* зоны горения. В частности, в первом случае имеет место *удлинение* пламени при его вращении, в то время как во втором — пламя становится *короче*. Одна из возможных причин заключается в том, что интен-

сивность турбулентных флуктуаций снижается под действием центробежных сил в условиях внешней циркуляции поля скорости [1, 8]. В результате этого, скорость турбулентного перемешивания падает, что приводит к отмеченному выше удлинению и сужению турбулентного вращающегося пламени.

Предыдущие исследования вращающихся естественно-конвективных пламён в помещениях показали, что они, как правило, неустойчивы [7]. Квазипериодическое возникновение, прецессия и последующее разрушение наблюдалось и в наших экспериментах и численных расчётах [2]. Численные расчёты [2] показали, что среднее значение периода формирования вращающегося пламени уменьшается по мере роста скорости газификации горючего материала. Иными словами, при горении более летучих жидкостей (либо – порождающих большую тепловую мощность факела) расчёты предсказали увеличение частоты процесса.

В данной работе в целях проверки данного вывода из численных расчётов представлены эксперименты с использованием трёх горючих жидкостей, имеющих существенно разные скорости выгорания в «нормальных» условиях (т.е. в открытой атмосфере в отсутствие закрутки). Приводится сравнение измеренных скоростей выгорания обычных и вращающихся пламён. Кроме того, приводится сравнение расчётной и экспериментальной временной динамики процесса.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Вращающиеся естественно-конвективные пламёна исследовались в помещении с размерами 2.77 м (лицевая стена), 2.4 м (боковая стена) и 2.29 м (высота). В лицевой стене имеется дверной проём шириной 0.8 м и высотой 1.95 м, вертикальная граница которого расположена на расстоянии 0.135 м от боковой стены помещения. В центре потолка расположен прямоугольный горизонтальный проём с размерами 0.8 и 0.9 м (широкая сторона параллельна лицевой стене помещения). В центре пола (под потолочным проёмом) располагали цилиндрическую ёмкость с горючим высотой 0.3 м и диаметром 0.6 м. Вид помещения представлен на рис. 1 вместе с результатами численных расчётов. Жидкое горючее непрерывно подавали в ёмкость, поддерживая постоянную высоту поверхности горючего. Это позволило измерить количество горючего, сгорающего в единицу времени. Использовали три вида горючих (этанол, керосин и гептан), имеющих существенно разные летучесть и скорость выгорания в «нормальных» условиях. Значения скоростей выгорания, приведённые в литературе [9] и соответствующие горению толстого слоя жидкости в неограниченной и неподвижной атмосфере, составляют 14-16, 28-38 и 34-60 г/(м²·с) для этанола, керосина и гептана соответственно. Наши измерения, выполненные в открытом пространстве с использованием описанной выше системы подачи горючего, привели к средним значениям 18, 27 и 40 г/(м²·с), что

согласуется с литературными данными. В то же время, средние значения скорости выгорания *при вращении пламени* в помещении (ещё раз подчеркнём, что система подачи горючего одинакова во всех экспериментах) составили 38, 39 и 72 г/(м²·с). Следовательно, имело место *увеличение* скорости выгорания на величину от 40 до 100%.

Возможное объяснение этого эффекта заключается в том, что закрутка течения интенсифицирует захват воздуха в область вблизи поверхности горючего и увеличивает скорость смешения компонентов. Поскольку в указанной области концентрация горючего достаточно велика, дополнительный приток окислителя приводит к интенсификации тепловыделения и теплопередачи к поверхности горючего, что и увеличивает скорость его выгорания.

При зажигании паров горючего (использовали переносную газовую горелку) имели место быстрый охват пламенем всей поверхности горючего и одновременное формирование факела. Вблизи поверхности потолка возникал дымовой слой. На этой стадии имело место истечение продуктов горения как через горизонтальный потолочный проём, так и через верхнюю часть вертикального дверного проёма. Затем факел начинал вращаться в направлении от дверного проёма. При этом длина факела заметно увеличивалась – настолько, что верхняя часть пламени выходила через потолочный проём за пределы помещения. На этой стадии все продукты сгорания покидали помещение только через потолочный проём, истечение через вертикальный дверной проём прекращалось. Затем вращающийся факел терял устойчивость и разрушался. После этого пламя над поверхностью горючего выглядело как обычное пламя, наклонённое по действием бокового потока воздуха, поступающего через дверной проём. Однако затем вновь возникал вращающийся факел, и процесс повторялся.

Поведение пламени было несколько разным в зависимости от силы и направления ветра за пределами помещения, поэтому точная повторяемость длительности стадий не достигалась. Однако наблюдения позволили приблизительно оценить характерные периоды формирования вращающегося пламени при слабом влиянии ветра: они составили 20-30, 10-15 и 5-7 секунд для этанола, керосина и гептана соответственно. Эти данные приведены в табл. 2 вместе с данными о мощности тепловыделения на единицу площади поверхности горючего.

Данные табл. 2 показывают, что массовые скорости выгорания оказались близкими для вращающихся пламён этанола и керосина. Однако, благодаря значительному различию в теплотах сгорания Δh_c , мощности тепловыделения оказываются различными; при этом видно, что они *коррелируют с измеренными периодами*. Это показывает, что численный прогноз увеличения частоты процесса с ростом скорости выгорания горючего [2] (расчёты выполнялись для одного и того же горючего) получил подтверждение в экспериментах.

Таблица 2. Результаты измерений

Горючее	Δh_C , МДж/кг	Режим				
		Пламя в открытом пространстве		Вращающееся пламя в помещении		
		\dot{m}_{fuel} , г/(м ² ·с)	$\Delta h_C \dot{m}_{fuel}$, кВт/м ²	\dot{m}_{fuel} , г/(м ² ·с)	$\Delta h_C \dot{m}_{fuel}$, кВт/м ²	Средний период, с
Этанол	26.8	18	480	38	1020	20-30
Керосин	44.1	27	1190	39	1720	10-15
Гептан	44.4	40	1780	72	3200	5-7

3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

3.1. Модель и код

При численном моделировании естественно-конвективного вращающегося пламени использован трёхмерный компьютерный код *Fire3D*, ранее разработанный одним из авторов для расчётов естественно-конвективных турбулентных диффузионных пламен в открытом пространстве и в помещениях [10, 11]. Модель использует осреднённые по Фавру уравнения Навье—Стокса для многокомпонентной (горючее, O₂, CO₂, H₂O, N₂, CO и сажа С) реагирующей среды в существенно дозвуковом приближении (RANS). Осреднённые уравнения замкнуты с помощью *k-ε*-модели. Поскольку характерное время рассматриваемого нестационарного процесса (порядка 10 с) существенно превышает временные масштабы турбулентных флуктуаций, по которым осредняются уравнения, применение нестационарных RANS-уравнений (URANS) представляется оправданным.

Однако, стандартная версия *k-ε*-модели не учитывает каких-либо эффектов, связанных с закруткой потока. Для того, чтобы модель турбулентности позволила воспроизвести экспериментально наблюдавшиеся вытягивание и сужение вращающегося пламени по мере ускорения его закрутки, модель была модифицирована, как показано в [2].

Принимали следующие значения параметров обобщённого углеводородного горючего, по свойствам близкого к керосину: химическая формула C₁₄H₃₀, энтальпия образования -387.5 кДж/моль (соответствует низшей теплоте сгорания 44.1 МДж/кг). При моделировании горения рассматривали протекание одностадийной необратимой реакции неполного окисления горючего, в результате которой наряду с CO₂ и H₂O образуются CO и С (сажа). Для расчёта образования CO и С использовали постоянные значения, χ_{CO} и χ_C , доли атомов углерода в молекуле горючего, переходящих в CO и С. В соответствии с имеющимися литературными данными полагали $\chi_{CO} = 0.007$ и $\chi_C = 0.04$. Скорость выгорания реагентов в турбулентном пламени определяли по модели дробления вихрей.

Для расчёта переноса теплового излучения использовали метод Монте-Карло [11]. Эффективный коэффициент поглощения смеси газообразных продуктов сгорания и сажи определяли по данным об интегральной степени черноты смеси с помощью метода взвешенной суммы серых газов. Особенно-

сти численной реализации модели, а также результаты её апробации при сравнении расчётов с результатами измерений в естественно-конвективных турбулентных пламенах приведены в [10, 11].

3.2. Результаты расчётов

Размеры расчётной области 3.3x2.77x3.29 м превышали размеры помещения, чтобы воспроизвести условия неограниченного пространства. Использована неравномерная декартова сетка из 122 880 контрольных объёмов (48x40x64) с минимальными размерами ячейки 0.0375x0.0375x0.03 м вблизи поверхности горючего.

Примеры расчётов показаны на рис. 1. Численные эксперименты, как и натурные, привели к выводу о том, что вращающееся пламя в помещении нестационарно и внутренне неустойчиво. Это проявляется в квазипериодическом возникновении огненного вихря, его вытягивании и выпрямлении, раскачке, прецессии вокруг оси и последующем разрушении с образованием обычного, невращающегося пламени, наклонённого потоком входящего воздуха. Механизм образования огненного вихря, предложенный в [2], предполагает определяющую роль растяжения вихревой трубки осреднённого течения с одновременным ростом завихрённости на её оси. Анализ уравнения для завихрённости показывает, что оно содержит источниковый член $\omega_z \partial v_z / \partial z$, где v_z — вертикальная проекция скорости.

Следовательно, для усиления завихрённости требуется одновременное выполнение двух условий: (1) ненулевая проекция вихря на вертикальную ось (обеспечивается циркуляцией внешнего течения, возникающего при втекании воздуха через несимметрично расположенный проём); 2) положительное ускорение потока по вертикали (обеспечивается архимедовой силой, действующей на горячие продукты горения в зоне пламени).

Как видно на рис. 1а и 1б, если оба условия одновременно выполняются, то формируется сильно удлиненное вращающееся пламя. Вызванное им увеличение потока воздуха, входящего через проём, в конечном счёте, приводит к разрушению вихря: указанный поток смещает вихревую трубку и отрывает её от пламени (рис. 1в). Дальнейшее смещение вихревой трубки в дальний угол оставляет её без источника завихрённости, что и приводит к последующему распаду огненного вихря. Таким образом, формирование вращающегося пламени приводит к увеличению притока воздуха, который, в свою очередь, разрушает огненный вихрь.

Расчёты пламён были выполнены как в условиях постоянного, наперёд заданного, расхода горючего, так и при расходах горючего, зависящих от воспринятого горючим теплового потока. В последнем случае оказалось, что неустойчивость вращающегося пламени усиливается, поскольку появляется ещё

один дестабилизирующий механизм. В результате процесс формирования и разрушения вихря становится аperiodическим, причём частота, соответствующая максимуму спектра (0.1 Гц), по-прежнему согласуется с измеренным средним значением.

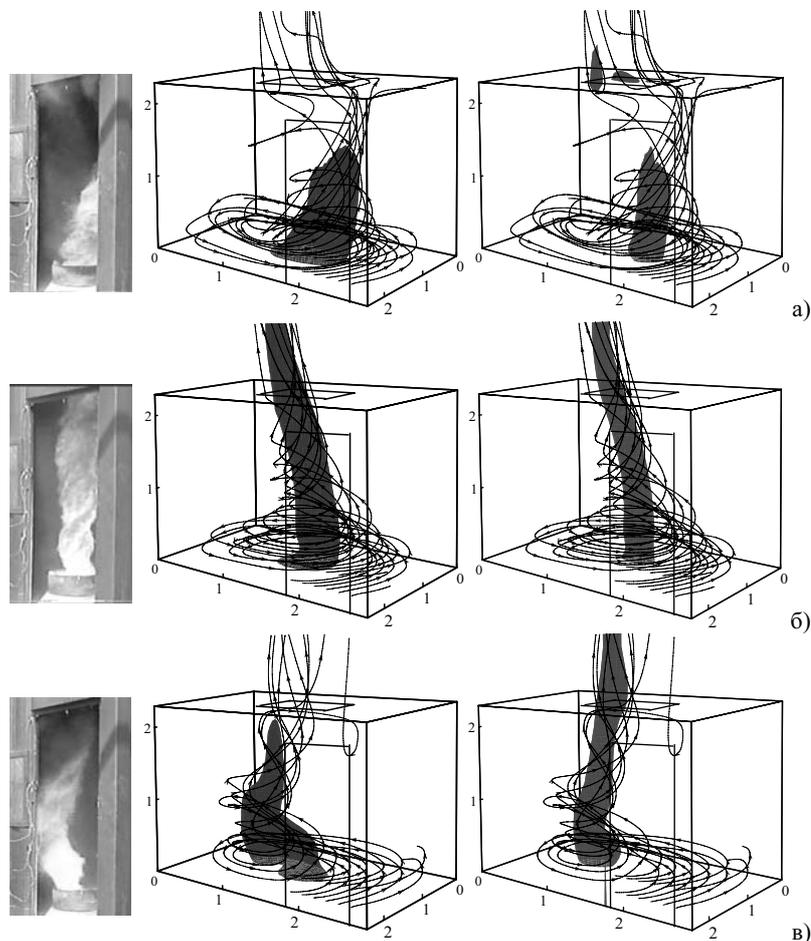


Рис. 1. Сравнение реального и расчётного течения. Слева направо: фотографии вращающегося естественно-конвективного пламени; поверхность средней температуры 773 К (пламя); поверхность завихрённости осреднённого течения $\omega_z = 15 \text{ c}^{-1}$ (вихревая трубка). Стадии эволюции пламени: *а* – пламя отклонено в направлении дверного проёма, начало формирования вихря; *б* – прямолинейный вытянутый огненный вихрь, пламя простирается через проём в потолок; *в* – вихрь отделяется от пламени и смещается входящим потоком воздуха в дальний угол. Линии тока начинаются в плоскости дверного проёма на высоте 0.2 и 0.4 м над уровнем пола. Скорость выгорания горючего $40 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована самоорганизация естественно-конвективного турбулентного диффузионного пламени, приводящая к формированию «огненного смерча» над поверхностью жидкого горючего. Приводятся экспериментальные данные, подтверждающие ранее полученные авторами численные прогнозы о влиянии скорости выгорания жидкого горючего на динамику вращающегося пламени. С помощью численных экспериментов продемонстрирован механизм формирования и разрушения огненного вихря.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ 06-01-00403-а, GR/S69122/01 и RSRG 24350.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Emmons H.W., Ying S.J.** // Proc. Combust. Inst., 1966. Vol. 11. P. 475–488.

2. **Snegirev A.Yu., Marsden J.A., Francis J., Makhviladze G.M.** // Int. J. Heat Mass Transfer. 2004. Vol. 47. P. 2523–2539.
 3. **Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N.** Swirl Flows. Abacus Press, 1984.
 4. **Fernando H.J.S., Smith D.C.** // Eur. J. Mech. B – Fluids, 2001. Vol. 20. P. 437–470.
 5. **Soma S., Saito K.** // Combust. Flame, 1991. Vol. 86. P. 269–284.
 6. **Рыжов А.М., Гостинцев Ю.А.** // Препринт ИХФ РАН, Черноголовка. 1993, 65 с.
 7. **Satoh K.** // Proc. 7th Int. Conf. Interflam'96, InterScience, 1996. P. 393–402.
 8. **Sloan D.G., Smith P.J., Smoot L.D.** // Progr. Energy Combust. Sci., 1986. Vol. 12. P. 163–250.
 9. **Babrauskas V.** // Fire Technology. 1983. Vol. 19. P. 251–261.
 10. **Снегирев А.Ю., Махвиладзе Г.М., Талалов В.А., Шамшин А.В.** // ФГВ, 2003. Т. 39, № 1. С. 3–14.
 11. **Snegirev A.Yu.** // Combust. Flame, 2004, Vol. 136, P. 51–71.