

Т а б л и ц а 2

Изменение концентрации природного газа в отходящих из псевдооживленного слоя катализатора газах от температуры слоя

T, К	Метан, %	Диоксид углерода, %	τ , с	T, К	Метан, %	Диоксид углерода, %	τ , с
373	8,7	0,2	0,14	723	7,3	1,4	0,27
473	8,7	0,2	0,18	753	6,2	2,5	0,29
573	8,7	0,2	0,22	773	5,8	2,9	0,29
673	8,1	0,6	0,26	793	4,0	4,7	0,30

пасность проведения окислительного процесса: порозность и высоту слоя катализатора. Для этого полученное уравнение решается относительно ϵ при определенной T .

При температуре слоя выше начала окисления горючего на катализаторе глубина проникновения пламени в псевдооживленный слой катализатора меньше, чем у идентичных инертных насадок и зависит от степени конверсии горючего.

Каталитически активный псевдооживленный слой — более эффективная система локализации пламени, чем псевдооживленная инертная насадка. В определенных условиях его гасящие свойства могут превзойти стационарную насадку и, более того, вывести газовую фазу из области взрываемости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Розловский А. И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами.— М.: Химия, 1980.
2. Гликин М. А. и др. ФГВ, 1979, 15, 1, 115.
3. А. с. 833575 СССР // Открытия. Изобрет.— 1981.— № 20.
4. Гликин М. А. Хим. пром-сть, 1976, 7, 505.
5. Грановский Э. А., Махлин В. А., Водяник В. И. ТОХТ, 1984, 18, 5, 688.
6. Бабкин В. С., Лаевский Ю. М. ФГВ, 1987, 23, 5, 27.
7. Гликин М. А. и др. ФГВ, 1984, 20, 5, 43.

Поступила в редакцию 28/III 1988,
после доработки — 9/VI 1988

УДК 536.46

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СПОНТАННОГО ОБРАЗОВАНИЯ ВИХРЕВОГО ДИФФУЗИОННОГО ПЛАМЕНИ

М. В. Алексеев, В. П. Самсонов, И. Г. Фатеев
(Тюмень, Чебоксары)

В прикладных задачах диффузионного горения свободная конвекция традиционно рассматривается как фактор, влияющий на длину пламени. Однако при определенных условиях в узком интервале скоростей ламинарного пламени, весьма далеко от начала турбулентности, подъемные силы изменяют не только длину пламени, но и коренным образом перестраивают его поле скоростей. В настоящее время сведения по этому вопросу в литературе отсутствуют. Между тем гидродинамика пламени во многом определяет процессы тепло- и массопереноса в различных горелочных устройствах.

Цель настоящей работы — изучение условий образования вихревого диффузионного пламени при вдуве газа на твердую плоскую поверхность. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Ни нижнюю

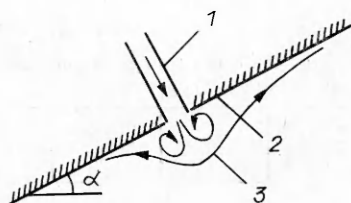


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

отполированную поверхность пластины 2, изготовленной из нержавеющей стали, через круглую горелку 1 вдували пропан. Газ зажигали снизу у среза горелки. Угол наклона пластины к горизонту $\alpha = 0 \div 90^\circ$, внутренний диаметр горелки $0,5 \div 7,8$ мм, границы объемного расхода газа $0,01 \div 0,35$ л/мин. Недогорание пропана приводило к образованию в пламени ярко светящихся сажевых частиц. Это позволяло с помощью кино- и фотосъемки визуализировать течение газа. Кроме того, сажевые частицы осаждались на отполированной поверхности пластины и оставляли характерные отпечатки, соответствующие линиям тока газа, движущегося в пограничном слое.

Эксперименты показали, что при $\alpha > 40^\circ$ наблюдается устойчивое ламинарное пламя, примыкающее к поверхности и переходящее в турбулентное при скоростях вдува газа на срезе горелки, соответствующих критическим для течения в трубе. Уменьшение α приводит к тому, что при некоторой скорости вдува течение газа внутри светящейся зоны диффузионного пламени становится вихревым (см. рис. 1, 3). Типичная фотография сажевого отпечатка, иллюстрирующая такое течение в пламени, представлена на рис. 2, а. Устойчивость образующегося вихревого течения столь велика, что позволяет определять по сажевым отпечаткам местоположение различных зон пламени с точностью до 0,1 мм. Максимальная скорость вращения частиц газа в вихре и его наибольшая устойчивость достигаются при определенных соотношениях угла наклона поверхности, скорости вдува газа v и диаметра горелки d . Изменение величины хотя бы одного из трех параметров ведет к быстрой потере устойчивости и прекращению вихреобразования. В области малых v и α устойчивость вихревого пламени внезапно нарушается, а структура течения в пламени изменяется, само течение вновь становится устойчивым, а вращение газа в пламени происходит в противоположном направлении (см. рис. 2, б).

Для выяснения физических причин возникновения устойчивого вихревого течения в светящейся зоне пламени проделаны опыты с горизонтально расположенной пластиной, через которую вертикально вниз вдували пропан. Движение ярко светящихся сажевых частиц наблюдали визуально и фотографировали. На рис. 3 видно, что траектории сажевых частиц визуализируются в пламени в виде черных колец. Наблюдения показывают, что плоскости вращения сажевых частиц непрерывно меняют свое положение так, что течение в пламени напоминает быстро вращающийся тор. Частота вращения газа в торе равняется $25 \div 30$ Гц. Таким образом, сажевые отпечатки, представленные на рис. 2, а, являются проекциями вихревого тора на поверхность вдува.

Результаты опытов по визуализации течения в пламени дают основания предположить следующую качественную картину образования вихревого движения в пламени, сходную с образованием кольцевого вихря, предложенную в [1]. Струя газа при движении вниз тормозится не только за счет действия вязких сил, а главным образом вследствие действия архимедовых сил, появляющихся из-за разности плотностей продуктов горения и холодного окружающего воздуха. Торможение приводит к расширению передней части струи и появлению поперечного течения. Свободноконвективное движение газа вверх в области химического реагирования и максимального тепловыделения (на границе светящейся зоны) и течение вниз (вдоль оси струи) приводят к рециркуляции газа. Определенное соотношение скоростей продольного (вдоль оси струи) и попе-

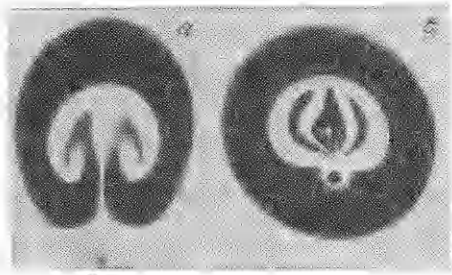


Рис. 2. Фотографии сажевых отпечатков вихревого диффузионного (а) и «обращенного» вихревого пламени (б).

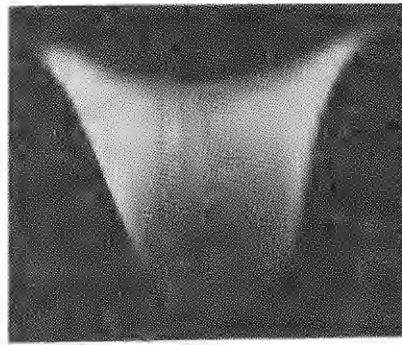


Рис. 3. Траектория светящихся сажевых частиц в пламени.

речного течений и скорости свободноконвективного подъема продуктов горения объясняет появление двух устойчивых форм течения, представленных на рис. 2.

В целом физические явления, вызывающие вихревое течение в пламени, аналогичны появляющимся при поднятии в атмосфере термика с поверхности земли и рассмотрены в [2, 3]. Их отличие заключается в причинах, вызывающих движение газа и его торможение. Если вдуваемый поток тормозится за счет набегающего потока, то уместна аналогия с течением, изученным в [4]. Это подтверждается наблюдениями за течением в пламени, особенно в предвихревом режиме.

Течение в вихревом диффузионном пламени по окончании времени, необходимого для развития свободной конвекции, становится стационарным. Тот факт, что вихревое течение не образуется при больших углах наклона поверхности, можно объяснить тем, что составляющая скорости конвективного подъема продуктов горения вдоль оси горелки становится меньше скорости вдува газа. Действительно, как показывают эксперименты, вихревое пламя не образуется при вдуве газа даже на горизонтальную поверхность, если скорость вдува меньше скорости конвективного подъема продуктов горения. В этом случае продукты горения просто растекаются вдоль поверхности, причем линии тока аналогичны описанным в [4], когда существует неоднозначность параметров течения в окрестности линии, разделяющей набегающий (в нашем случае — свободноконвективный) и вдуваемый потоки. Вихревое движение прекращается также и при небольших углах наклона поверхности, если перпендикулярную к поверхности составляющую скорости свободноконвективного подъема продуктов горения уменьшить каким-либо способом, например придвиганием к поверхности другой, параллельной ей поверхности.

Для проверки гипотезы о физических причинах, вызывающих вихреобразование в пламени, проделаны эксперименты с химически инертными потоками. Поскольку вдув инертного нагретого газа при температурах, близких к температуре горения, затруднен ввиду сложности термостатирования, проведены опыты с жидкостями различной плотности. В прямоугольную кювету размером $15 \times 15 \times 30$ см наливали насыщенный раствор поваренной соли в воде. Через вертикальную трубку, касающуюся нижним концом поверхности раствора, вливали подкрашенный этиловый спирт. При определенных для данного диаметра трубки расходах наблюдали вихревое движение в струе спирта, растекающегося затем вдоль свободной поверхности раствора. Появление архимедовых сил обусловлено различием плотности спирта и раствора соли. Форма и размеры вихрей существенно отличались от тех, что наблюдали в пламени. Это можно объяснить различием в протекании диффузионных процессов и большей локальностью действия массовых сил в пламени вследствие фронтальности химической реакции при горении.

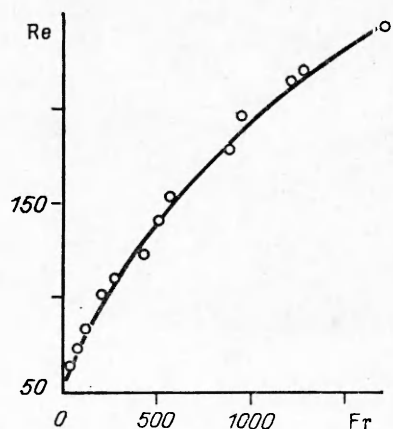


Рис. 4. Критериальная зависимость, определяющая условия вихреобразования.

Дальнейший анализ полученных результатов показывает, что поле течения в диффузионном пламени, образованном при горении газа, вдуваемого на нижнюю поверхность наклонной пластины, определяется следующими параметрами: диаметром горелки d , скоростью вдува газа v , вязкостью ν , плотностью и температурой газа ρ и T , углом наклона поверхности α и ускорением свободного падения g . Анализ размерностей перечисленных параметров дает безразмерные критерии:

$Re = dv/\nu$ число Рейнольдса, $Fr = v^2(\cos \alpha/g)d$ — модифицированное число Фруда. Так как опыты проводили в большом интервале величин v и d , это позволило получить экспериментально критериальную зависимость $Re = f(Fr)$, выражающую условия вихреобразования (рис. 4).

Области значений чисел $Re \geq 90$ и $Fr \geq 200$ определяют условия, соответствующие течению в пламени, показанному на рис. 2, а, а для $Re \leq 90$ и $Fr \leq 200$ характерно существование «обращенного» вихревого диффузионного пламени. Какая-либо переходная область между условиями возникновения двух различных форм вихревого движения отсутствует. Для каждой из двух форм движения угловая скорость вращения газа ω постоянна. Это следует из результатов эксперимента. Тогда, выразив угловую скорость через число Струхала $Sh = \omega d/v$, ее можно описать эмпирической формулой $Sh = \text{const} \approx 0,06 Re^{0,7} Fr^{-0,6}$, где $Sh \approx 50 \cdot 10^{-3}$ при $Re \geq 90$, $Fr \geq 200$ и $Sh \approx 2$ при $Re \leq 90$, $Fr \leq 200$.

Закономерности вихреобразования и структура вихревого течения в пламени для других горючих газов с иными реакционными и теплофизическими свойствами, такими как диффузионная способность, температура горения и др., будут иными. Представляют интерес дальнейшие исследования в этом направлении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров П. А. Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, 2, 19.
2. Андрущенко В. А. // Там же, 1978, 2, 186.
3. Гостинцев Ю. А., Суханов Л. А., Солодовник А. Ф. Докл. АН СССР, 1980, 252, 2, 311.
4. Антонов В. А., Гольдин В. Д., Гришин А. М. ПМТФ, 1984, 1, 82.

Поступила в редакцию 19/IV 1988,
после доработки — 15/IX 1988

УДК 519.2 + 518.5 : 662.749.2 : 542.993

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ КОКСА

Е. С. Головина, Р. А. Калинин, А. А. Левицкий,
Ю. А. Мирохин, Л. С. Полак, О. С. Юсим
(Москва)

В настоящее время в СССР и за рубежом интенсивно ведутся разработки высокотемпературных плазмохимических процессов газификации твердого топлива с целью получения синтез-газа и газообразного энергии-