

ВЛИЯНИЕ НЕГОРЮЧИХ ПРИМЕСЕЙ НА ДЛИНУ ПРИСОПЛОВОГО ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ДИФфуЗИОННОГО ФАКЕЛА ПЛАМЕНИ

Г. Г. Шемяков, В. Ф. Комов

Проведенные ранее теоретические и экспериментальные исследования [1—10] позволили установить сложный характер зависимости относительной длины L/d свободногорящего турбулентного диффузионного факела от начальной скорости истечения u и диаметра выходного сечения трубы d . Подробное рассмотрение характера влияния начальной скорости истечения и диаметра трубы (горелки) на длину турбулентного диффузионного факела проведено в работах [8—10]. Установлено, что сложный характер зависимости длины факела от начальной скорости истечения газа и диаметра горелки обусловлен влиянием архимедовой силы на процесс обмена количеством движения между факелом и окружающей атмосферой в поле сил тяжести. В наибольшей степени это влияние наблюдается при горении водорода, имеющего наименьшую плотность из всех горючих газов и наибольшую температуру горения.

На рис. 1 показана зависимость относительной длины присоплового диффузионного факела пламени водорода от числа Re (направление истечения — вертикально вверх). В опытах использовались трубчатые горелки из нержавеющей стали с различным диаметром канала d . Горелки 1—7 имели относительную длину цилиндрического канала $l/d=50$, 8— $l/d=20$ и 9— $l/d=10$. Измерение длины факела визуальное по концу светящегося факела (в затемненном помещении).

Из рис. 1 видно, что независимость длины турбулентного факела от Re наблюдается лишь для горелок малых диаметров (1,45 и 1,9 мм). Для остальных горелок длина турбулентного факела растет с повышением скорости истечения и числа Re в выходном сечении горелки, приближаясь к предельному значению, равному для водорода ~ 220 . С увеличением диаметра горелки относительная длина факела при одинаковом Re уменьшается.

Такой характер зависимости L/d от начальной скорости истечения и диаметра канала горелки может быть объяснен различной степенью влияния архимедовой силы на процесс смешивания в факеле. Эта степень влияния, как следует из работ [1, 3, 6—10], должна зависеть (для данного вида горючего газа) от величины числа Фруда $Fr = u^2/gd$ таким образом, что при $Fr \rightarrow \infty$ $L/d = \text{const}$, при $Fr < Fr^*$ $L/d \sim Fr^{0.2}$, а в промежуточной области $L/d \sim Fr^n$, где $0 < n < 0.2$.

Зависимость относительной длины турбулентного факела водорода (для горелок с $d=1,45$ и 1,9 мм при $Re \geq 4000$, для остальных горелок при $Re \geq 2300$) от числа Fr в логарифмических координатах показана на рис. 2, II (обозначения соответствуют рис. 1).

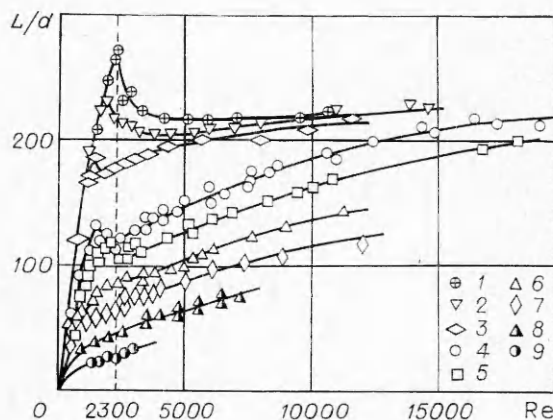


Рис. 1. Зависимость L/d от Re при горении струи водорода.

d , мм: 1—1,45, 2—1,9, 3—2,9, 4—4,0, 5—6,0, 6—10,75, 7—15,5, 8—21, 9—31,7.

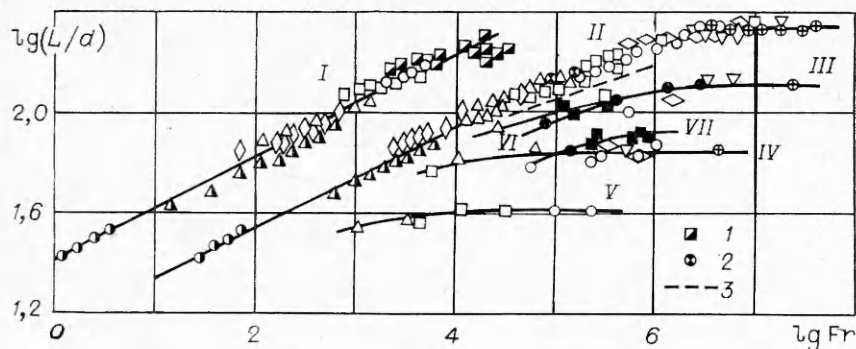


Рис. 2. Зависимость L/d от Fr для турбулентных диффузионных пламен метана и водорода и смесей водорода с азотом и гелием.

Как видно из рис. 2, при $Fr \geq 2 \cdot 10^6$ $L/d = \text{const}$, при $Fr \leq 10^5$ $L/d \approx Fr^{0.2}$, а в области $10^5 < Fr < 2 \cdot 10^6$ длина пламен с ростом Fr увеличивается, приближаясь к предельному значению ($L/d = 220 = \text{const}$). Эмпирические соотношения, описывающие зависимость L/d от Fr

$$Fr \geq 2 \cdot 10^6 \quad L/d = 220, \quad (1)$$

$$Fr \leq 10^5 \quad L/d = 14 Fr^{0.2}, \quad (2)$$

$$10^5 < Fr < 2 \cdot 10^6 \quad L/d = 24 Fr^{1/7}. \quad (3)$$

Эти результаты находятся в хорошем соответствии с результатами работ [2, 8—10]. На кривую II попадают результаты работ [5, 11] (кривая 3, точки 2 соответственно).

При представлении результатов в виде зависимости L/d от Fr в данной работе не установлена наблюдавшаяся в [9] слабая зависимость относительной длины факела от диаметра канала. Это обусловлено, по-видимому, ошибкой измерения длины факела при его визуальном наблюдении.

На рис. 2, I нанесены также данные для присопловых турбулентных диффузионных пламен метана при начальной температуре газа, равной температуре окружающей среды. Для метана

$$L/d = 27 Fr^{0.2}, \quad (4)$$

что находится в соответствии с результатами работ [2, 12] (в [2] — $L/d = 29 Fr^{0.2}$, точки 1 — работа [12]).

«Площадка» ($L/d = \text{const}$) для присопловых турбулентных диффузионных пламен метана не достигается, поскольку при скоростях истечения и диаметрах горелок, соответствующих примерно $Fr > 10^4$, турбулентные ($Re > 2300$) пламена метана отрываются от края горелки. По-видимому, такой же результат должен наблюдаться и для других углеводородных горючих газов.

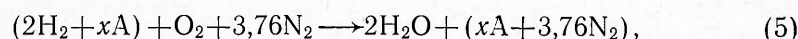
На рис. 2 нанесены также опытные точки для турбулентных диффузионных пламен смесей водорода с азотом (кривые III—V) и гелием (кривые VI, VII, зачерненные значки). Кривая III — смесь 10% N_2 + 90% H_2 (по объему), IV — 30% N_2 + 70% H_2 , V — 50% N_2 + 50% H_2 ; VI — 30% He + 70% H_2 , VII — 51% He + 49% H_2 .

Из рис. 2 видно, что при увеличении концентрации азота в смеси происходит уменьшение длины факела, расширение области независимости L/d от Fr за счет смещения ее границы в сторону более низких чисел Fr и смещение в область более низких значений Fr переходной области значений L/d .

В то же время при увеличении концентрации гелия в смеси заметно снижается лишь длина факела пламени, а смещение границ харак-

терных областей числа F_r почти не происходит, поскольку степень воздействия архимедовой силы остается, по-видимому, такой же, как в пламенах чистого водорода, в то время как добавка азота в водород приводит к уменьшению влияния архимедовой силы на процессы переноса в факеле.

Для областей числа F_r , где $L/d = \text{const}$, оказалось возможным использование известной формулы Хоттеля [11] для оценки степени сокращения относительной длины факела смеси по сравнению с длиной факела чистого водорода, т. е. $L^* = (L/d)_{\text{см.}} : (L/d)_{\text{чист.}}$. При этом, в соответствии с данными рис. 2, численный коэффициент для водорода в формуле Хоттеля нужно взять равным примерно 7,8 (вместо 5,3), молекулярный вес горючего M_N вычислить для соответствующего состава смеси, а величины C_T и α_T (молярная концентрация горючего в смеси горючее+окислитель и отношение молей исходных реагентов к молям продуктов сгорания, соответственно) рассчитать по стехиометрическому уравнению



в котором за горючее считается смесь $2\text{H}_2 + x\text{A}$. Здесь A — символ молекулы разбавителя, x — количество молей добавки в смеси $2\text{H}_2 + x\text{A}$. Температуры горения T_F смесей можно заимствовать из справочных данных (например, из «Приложения» к [14]).

Рассчитанная таким образом степень уменьшения относительной длины факела водорода в зависимости от процентного содержания m негорючей добавки в смесях водорода с гелием и азотом нанесена на рис. 3 кривыми, а экспериментальные значения — точками. Хорошее совпадение расчета с экспериментом подтверждает правильность методики расчета.

Изложенные результаты позволяют истолковать утверждение авторов работы [13] о независимости относительной длины турбулентного диффузионного факела от скорости истечения газа в атмосферу в любой области скоростей истечения. Используемые ими для подтверждения расчетов данные собственных экспериментов получены для горючих газов, сильно забалластированных азотом (например, смесь метана с азотом, содержащая 0,1 кг метана в 1 кг смеси). При проведении экспериментов в лабораторных условиях (горелки небольшого диаметра) такое разбавление должно автоматически приводить к попаданию значений L/d в область независимости от F_r .

Таким образом, разбавление горючего газа негорючей примесью, плотность которой близка к плотности воздуха, приводит не только к сокращению длины турбулентного диффузионного факела пламени, но и к смещению нижней границы характерных областей в сторону меньших значений числа F_r . Для упрощенных расчетов степени сокращения длины факела в области независимости L/d от F_r может быть использована формула Хоттеля с измененным численным коэффициентом.

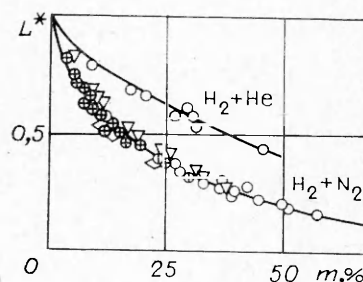


Рис. 3. Зависимость степени уменьшения относительной длины факела от процентного (по объему) содержания m негорючей примеси в смеси водорода с азотом и гелием.

ЛИТЕРАТУРА

1. F. R. Steward. Comb. Sci. and Technol., 1970, 2.
2. K. Heß. Dissertation. Karlsruhe, 1964.
3. Н. А. Замятина.— В сб.: Труды Общественного семинара по теории горения. М., «Наука», 1970.
4. П. В. Левченко, Б. И. Китаев. Сталь, 1952, 3, 265.
5. С. Н. Шорин, О. Н. Ермолаев. Теплоэнергетика, 1959, 2, 57.
6. Г. Г. Шевяков, В. Ф. Комов, С. Н. Шорин. 11-я Всесоюзная конференция по вопросам испарения, горения и газовой динамики дисперсных систем. Одесса, изд. ОГУ, 1972, с. 59.
7. В. Ф. Комов, Г. Г. Шевяков и др.— В сб.: Процессы горения и проблемы тушения пожаров. М., ВНИИПО МВД СССР, 1973.
8. В. И. Головичев, В. А. Ясаков. ФГВ, 1972, 8, 1, 51.
9. В. К. Баев, П. П. Кузнецов и др. ФГВ, 1974, 10, 4, 485.
10. В. К. Баев, В. А. Ясаков. ФГВ, 1974, 10, 6, 835.
11. В. Гаусс, Д. Уиддел, Г. Хоттель.— В сб.: Вопросы горения. Т. 1. М., ИЛ, 1953.
12. A. A. Putnam, C. F. Speich. 9-th Symp. on Comb. Academic — Press, New York — London, 1963, 867.
13. Л. А. Вулс, Ш. А. Ершин, Л. П. Ярин. Основы теории газового факела. Л., «Энергия», 1968.
14. Б. Льюис, Г. Элье. Горение, пламя и взрывы в газах. М., «Мир», 1968.

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ОБРАЗОВАНИЕ ОКИСИ АЗОТА ПРИ СЖИГАНИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

*Н. А. Гуревич, В. Ф. Стадник, А. Р. Брун-Цеховой, К. Е. Махорин,
И. Я. Сигал, Б. К. Ильенко, С. С. Курдюмов*

Несмотря на большое число публикаций по окислению азота в процессах горения, влияние давления на образование окиси азота остается малоизученным. Экспериментально установлено [1, 2], что выход окиси азота растет с увеличением давления в условиях, когда конечная концентрация NO лимитируется кинетикой ее образования. В данной работе исследовано образование окиси азота в условиях быстрого охлаждения (10^4 — 10^5 град/с) продуктов сгорания, характерного для горения в псевдоожигенном слое.

Опыты выполнены на экспериментальном стенде, описанном в [3]. Конструкция газораспределительной решетки для сжигания природного газа в псевдоожигенном слое под давлением приведена в [4]. Концентрация окиси азота в продуктах сгорания определялась линейно-колористическим методом по методике [5]. Контрольные измерения выполнялись колориметрическим методом с применением реактива Грисса и аппарата ФЭК-2М. Температура по высоте псевдоожигенного слоя контролировалась платиноводородно-платиновыми термопарами. В качестве псевдоожигенного материала использовался шариковый корунд фракции 0,5—1 мм.

Концентрация окиси азота в продуктах сгорания исследовалась в зависимости от давления (1—16 ат) и коэффициента расхода воздуха (0,8—1,2) для температуры слоя 900°C. При изменении давления и состава горючей смеси число псевдоожигения поддерживалось постоянным путем соответствующего изменения расходов газа и воздуха. В отдельной серии опытов проведено исследование влияния на концентрацию NO числа псевдоожигения (2,5—5), что эквивалентно изменению тепловой нагрузки сечения аппарата от $4 \cdot 10^9$ до $8 \cdot 10^9$ Вт/м². В опытах определялись по высоте слоя состав продуктов сгорания и содержание в них окиси азота.