

7. Линь Цзя Цзяо. Теория гидродинамической устойчивости. М. ИЛ, 1958.
8. Дж. В. Стретт (лорд Рэлей). Теория звука, т. 2. М., Гостехтеориздат, 1955.
9. H. Sato. J. Fluid Mech., 1960, 7, 1.
10. A. Michalke, O. Wehrmann. Third International Congress in the Aeronautical Sciences, Stockholm, Sweden, August 27—31, 1962, Paper NJCAS — 36.
11. О. В. Дубровская, К. П. Власов, Н. Н. Иноземцев. Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и транспорт, 1963, 2.
12. Н. Н. Иноземцев. Изв. АН СССР, ОТН, Энергетика и автоматика, 1960, 2.
13. В. Е. Дорошенко, С. Ф. Зайцев, В. И. Фулетов. ПМТФ, 1967, 1.

УДК 536.46

## ВИБРАЦИОННЫЙ ФАКЕЛ НАД КООКСИАЛЬНОЙ ГОРЕЛКОЙ

В. Н. Подымов, И. Ф. Чучалин  
(Казань)

Сжигание газообразных топлив часто осуществляется в устройствах с отдельной подачей горючего и окислителя [1]. Представление о таких устройствах дает горелка, состоящая из двух коаксиальных трубок (рис. 1). Подавая по внутренней трубке горючий газ, а по кольцевому зазору воздух и меняя их скорости, можно наблюдать, как стационарное, так и вибрационное горение [2]. Обнаруживаются три вида вибрационных режимов: открытый диффузионный факел, диффузионно-кинетическое пламя и пламенное кольцо у края газоподводящей трубки. В настоящей работе изучается вибрационное диффузионно-кинетическое пламя.



Рис. 1. Схема горелки.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

Внутренний радиус ( $R$ ) внешней трубки (кожуха) в опытах менялся от 6 до 9 мм, внутренний радиус газоподводящей трубки ( $r$ ) — от 2 до 4 мм. Все трубки имели толщину стенок  $\Delta = 1$  мм. Внутренняя трубка могла скользить по оси кожуха, допуская регулировку пути смещения  $h$  (см. рис. 1). В качестве горючих газов употреблялись  $H_2$ ,  $CO$ ,  $C_2H_2$  и  $C_3H_8$ . Расходы газа и воздуха не превышали 4 и 10  $см^3/сек$  соответственно. При заданном расходе газа вибрационный режим получается увеличением расхода воздуха до некоторой определенной величины. Колебания начинаются с резкого возрастания высоты пламени. Характер колебаний виден из рис. 2. Временная развертка получена в промежуток времени, за который стационарное пламя превратилось в колеблющееся (путем незначительного увеличения расхода воздуха). Как видно из рис. 2, колебания пламени существенно нелинейны, совершаются с отрывом верхней части и напоминают колебания пламени вибрационного открытого диффузионного факела [3]. Увеличение расхода воздуха приводит к появлению вибрационного или

стационарного кольца пламени у края газоподводящей трубки, а затем к образованию факела на газоподводящей трубке.

Если вместо воздуха по кольцевому зазору пустить инертный газ ( $N_2$ ,  $CO_2$ ), то описанных колебаний получить нельзя.

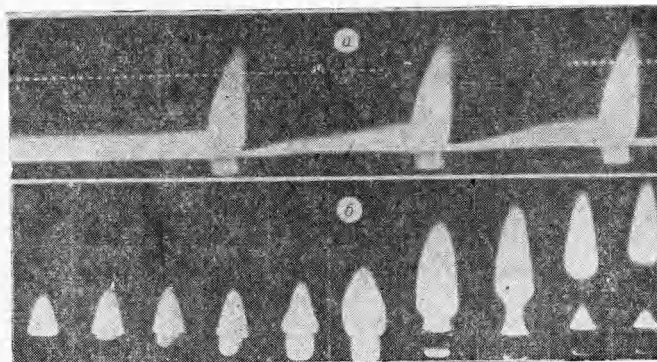


Рис. 2. Характер колебаний пламени  $CO$ .  
 а — временная развертка (метки времени — 50  $\mu c$ ), уменьшено в 3,3 раза; б — скачок пламени, уменьшено в 2,4 раза.

На рис. 3 показаны области существования колебаний пламен различных газов. Из рисунка видны различные интервалы существования колебаний по расходу воздуха, что указывает на зависимость явления от состава горючего. Возбуждение колебаний обеспечивается непропорциональным соотношением горючего и воздуха при различных расходах горючего — об этом говорят наклон и кривизна границ областей существования. Увеличение стехиометрического числа подчеркивает эту зависимость. Если газ содержит в своем составе воздух, то колебания возникают при меньшем расходе воздуха (богатая граница смещается влево). Увеличение пути смещения  $h$  сдвигает богатую границу к бедной, одновременно уменьшая площадь области существования колебания.

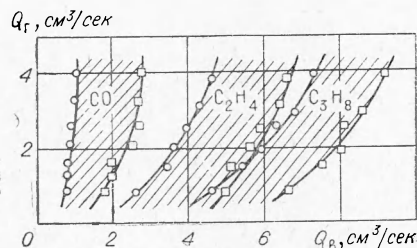


Рис. 3. Области вибрационного горения различных газов; горелка  $r=0,4$  см,  $R=0,6$  см,  $h=0,5$  см.

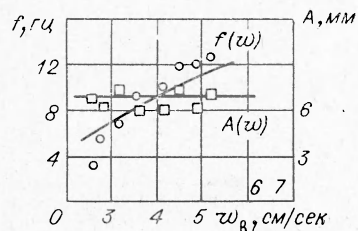


Рис. 4. Зависимость частоты и амплитуды колебаний пламени от скорости струи воздуха;  $\omega_r = 4,3$  см/сек; горелка:  $r=0,4$  см,  $R=0,6$  см,  $h=0,5$  см,  $\theta=1,2$ .

Частота колебаний зависит от скорости струи газа и воздуха, пути смещения  $h$ , химического состава газа. Если  $h$  постоянно, то при фиксированной скорости струи газа с увеличением скорости струи воздуха частота колебаний повышается (рис. 4). Наоборот, при фиксированной скорости струи воздуха с увеличением скорости струи газа частота ко-

лебаний понижается. Если зафиксировать обе скорости, но изменять  $h$ , то частота изменяется обратно пропорционально  $h$  (рис. 5). Применение других газов приводит к изменению интервала возбуждаемых частот. В любом случае частота колебаний меняется главным образом за счет изменения интервала времени между скачками пламени. Длительность самого скачка остается почти той же (см. рис. 2, а). Амплитуда колебаний высоты пламени от скорости струи воздуха практически не зависит (см. рис. 4), но с увеличением скорости струи газа она растет. Хорошо выражена зависимость амплитуды колебаний от сорта газа: для  $C_2H_4$  и  $C_3H_8$  она в 3—4 раза больше, чем для  $CO$  или  $H_2$ . Увеличение пути смещения увеличивает амплитуду по линейному закону (см. рис. 5).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поскольку основание пламени является областью кинетического горения, стабильность процесса должна обеспечиваться условиями проскока фронта пламени внутрь горелки. Рассмотрим условия горения вблизи богатой границы вибрационного горения. Пусть небольшое увеличение расхода воздуха меняет соотношение горючее — воздух в смеси, поступающей к краю пламени. Если принять в первом приближении, что концентрация смеси вблизи края пламени пропорциональна расходу воздуха, а зависимость нормальной скорости горения от концентрации выразить колоколообразной кривой, тогда можно составить график изменения нормальной скорости горения  $u_n$  и скорости движения смеси  $w$  (рис. 6). Пока расход воздуха

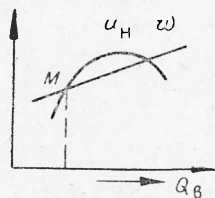


Рис. 6. Характер изменения нормальной скорости горения и скорости смеси в зависимости от расхода воздуха.

не достиг величины, отвечающей точке  $M$ ,  $u_n < w$ , но если расход воздуха становится больше указанной величины, соотношение скоростей обратное. Таким образом, при увеличении расхода воздуха в системе неизбежно создается положение, при котором вступает в силу условие проскока пламени [4]:

$$\left(\frac{du_n}{dr}\right)_{r \rightarrow R} = \left(\frac{dw}{dr}\right)_{r \rightarrow R}$$

Величина скорости движения смеси невелика (порядка сантиметров), поэтому для обеспечения проскока не требуется большого изменения концентрации смеси. Опытные данные свидетельствуют (см. рис. 3), что с увеличением расхода воздуха богатые границы вибрационного горения  $CO$ ,  $H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_3H_8$  достигают в такой же последовательности, в какой располагаются их богатые пределы воспламенения (75, 70, 29 и 9,5% соответственно).

Вначале пламя движется вниз, а затем распространяется в промежутке между газом и воздухом по смеси, способной к воспламенению. Можно положить, что в этом промежутке пламя в первую очередь будет

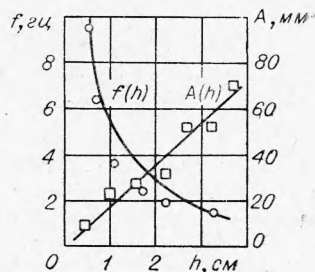


Рис. 5. Зависимость частоты и амплитуды колебаний пламени от пути смещения; горелка:  $r=0,4$  см,  $R=0,6$  см,  $Q_r=2,6$  см<sup>3</sup>/сек,  $Q_B=1,7$  см<sup>3</sup>/сек,  $\theta=1,2$ .

распространяться по прослойке, где концентрация близка к стехиометрической. Временная развертка (рис. 2, а) подтверждает это предположение, показывая, что горение внутри горелки продолжается некоторое время после того, как головная часть пламени достигнет края газоподводящей трубки. У края газоподводящей трубки пламя гаснет (но тоже не сразу), так как слой продуктов сгорания между газом и воздухом препятствует быстрому образованию смеси.

Выброс внешнего конуса пламени и одновременное замедление потока воздуха в зазоре вызываются быстрым образованием и расширением продуктов сгорания внутри горелки. Увеличение высоты внешнего конуса пламени начинается вслед за проскоком с очень небольшим запаздыванием (см. рис. 2). Однако тут же после выброса избытка продуктов сгорания охлаждение и сжатие оставшихся вызывает обратное движение газов в устье кожуха. Это приводит к разрыву внешнего пламени у основания и затягиванию нижней части внутрь кожуха (целиком при больших  $h$ ). Затягивание длится недолго, после чего пламя возвращается в прежнее положение. Верхняя часть пламени поднимается примерно с постоянной скоростью, быстро укорачиваясь со стороны разрыва до исчезновения. Теневые и интерференционные снимки показывают, что на уровне разрыва возникает циркуляционное движение в виде кольцевого вихря, опоясывающего место разрыва. В результате к основанию оторвавшейся части интенсивно подается свежий воздух, ускоряющий сгорание.

При охлаждении продуктов сгорания внутри кожуха начинается процесс образования смеси. В условиях некоторого разрежения и повышенной температуры происходит интенсивное смешение свежего газа с продуктами сгорания, а приток воздуха по кольцевому зазору вызывает перемещение этой смеси вверх к пламени и разбавление ее нижней части воздухом. По мере поступления воздуха идет образование газозадушной смеси. Очевидно, как только последняя достигает края пламени, вновь создаются условия для проскока и последовательность событий повторяется. Следовательно, причиной колебаний пламени является периодическое изменение состава горючей смеси, поступающей к основанию пламени.

Характер переходного процесса, а также форма колебаний пламени говорит о том, что в данном случае рассматривается релаксационная автоколебательная система. Для качественной оценки можно считать, что период колебания складывается из времени накопления горючей смеси  $t_1$  и времени ее сгорания  $t_2$ . Если принять расстояние от края газоподводящей трубки до точки воспламенения смеси равным пути смешения  $h$ , то  $t_1 = h/w$ , а  $t_2 = h/u$ , и частоту колебаний как величину, обратную периоду, можно выразить формулой

$$f = \frac{1}{h} \frac{uw}{u + w} \quad (1)$$

Величины  $w$  и  $u$  имеют смысл средних значений скорости движения смеси и скорости распространения пламени. Некоторый подопрев, обусловленный близостью факела, увеличит  $w$  в  $\theta = T/T_0$  раз, а  $u$  — в  $\theta^2$  раз [5]. Следовательно, вместо (1) получим

$$f = \frac{1}{h} \frac{u\theta w}{u\theta + w} \quad (2)$$

Формула (2) является приближенной, поскольку  $w$ ,  $u$  и  $\theta$  трудно взять точными. Кроме того, в период не было включено время, в течение которого совершается сложное движение продуктов сгорания и воз-

духа сразу после проскока пламени. Однако сопоставление расчетных кривых с экспериментальными точками, показанное на рис. 4 и 5, свидетельствует о ее пригодности к употреблению.

Амплитуда колебаний высоты внешнего пламени определяется количеством и степенью расширения продуктов сгорания, образующихся внутри горелки после проскока пламени, а также временем диффузионного горения газа в оторвавшейся части внешнего пламени. Эксперимент действительно показывает, что СО, реакция горения которого совершается с уменьшением числа молей, имеет амплитуду колебаний всегда меньшую, чем  $C_3H_8$ , сгорающий с увеличением числа молей. (Температуры сгорания у СО и  $C_3H_8$  близкие). Но у СО и  $H_2$  амплитуды одинаковые. Увеличение пути смешения также способствует росту амплитуды, поскольку пропорционально увеличивает количество способной к воспламенению смеси (см. рис. 4). На время существования оторвавшейся части пламени влияет расход газа, так как с увеличением расхода газа увеличивается его количество в отрывающейся части. Кроме того, имеет значение индивидуальная потребность в воздухе каждого газа. У пропана, например, она гораздо больше, чем у окиси углерода, а это значит, что при одинаковой интенсивности диффузионного смешения объем  $C_3H_8$  будет сгорать дольше такого же объема СО. Следовательно, этот фактор тоже способствует увеличению амплитуды колебаний.

*Поступила в редакцию  
10/VIII 1968*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Основы горения углеводородных топлив. М., ИЛ, 1960.
2. И. Ф. Чучалии, В. Н. Подымов. Матер. VII межвузовской конф. по вопросам испарения, горения и газовой динамике дисперсных систем. ОГУ. Одесса, 1967.
3. А. И. Маклаков. Канд. дисс. Казань, КГУ, 1955.
4. Л. Н. Хитрин. Физика горения и взрыва. М., МГУ, 1957.
5. Е. С. Щетников. Физика горения газов. М., «Наука», 1965.

УДК 536.46

### КРИТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ СОВОКУПНОСТИ ЧАСТИЦ

*Э. Н. Руманов, Б. И. Хайкин  
(Москва)*

Газ, в котором взвешены мелкие твердые частицы или жидкие капли, можно рассматривать как некоторую однородную среду, если характерные размеры задачи много больше, чем среднее расстояние между частицами. Точно так же обыкновенный газ рассматривают как непрерывную среду на расстояниях, намного превосходящих расстояния между молекулами. Как и в обычной гидродинамике, эта среда характеризуется (средней) плотностью  $\rho$ , скоростью  $v$  и т. д. Существенно.