

ВЛИЯНИЕ СЖИГАНИЯ ПРОПАНА НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Л. А. Заклязьминский, Р. С. Рожков
(Москва)

В последнее время достигнуты значительные успехи в создании инверсной населенности молекул углекислоты при расширении в сверхзвуковом сопле предварительно нагретой и находящейся в термодинамическом равновесии смеси газов [1]. Однако при таком методе создания инверсной населенности количество колебательной энергии, сохраненное в уровне (001) молекул углекислоты к моменту ее прихода в резонаторную полость, невелико. Это обусловлено как малой долей (1—2%) колебательной энергии в термодинамически равновесном газе при $T_0 = 1200 \div 1600$ К в форкамере установки, так и увеличением скорости релаксации колебательной энергии с ростом T_0 при протекании газа через сверхзвуковое сопло.

В работах [2—4] сделаны попытки использовать для создания инверсной населенности колебательную энергию молекулы CO_2 , полученную непосредственно в процессе химической реакции без промежуточного перехода ее в равновесное состояние. При этом предварительно подготовленная смесь реагирующих газов протекала через сопло после разрыва диафрагмы, установленной перед соплом. Такая постановка эксперимента не позволяет фиксировать зону горения относительно критического сечения сопла, поэтому выполнен эксперимент по сжиганию топлива (пропана) в стационарном потоке нагретого воздуха, протекающего через сверхзвуковое сопло. Эксперимент выполнялся с решеткой сопел и системой ввода газов, описанной в [5]. Коэффициент усиления измерялся на расстоянии 10 мм по потоку от среза решетки сопел. Номер перехода зондирующего лазера не фиксировался. Поскольку мощность, подводимая к лазеру, была близка к пороговой, предполагается, что генерация происходила лишь на вращательной линии с максимальным коэффициентом усиления, т. е. на линии Р20. Погрешность измерения коэффициента усиления в экспериментах не превышала 20%.

Решетка состояла из четырнадцати плоских сопел минимальной длины с высотой критического сечения $h = 1,2$ мм. Топливо вводилось (рис. 1) через форсунку 2, расположенную по центральной оси сопла в дозвуковой его части. Через отверстия в стенках сопел вводилась холодная углекислота. Воздух нагревался электрической дугой до $T_0 \approx 1000$ К, превышающей температуру самовоспламенения горючей смеси. Вначале топливо вводилось через щели в торцах форсунок параллельно в спутный поток воздуха. Оказалось, что топливо не загорается, когда место ввода топлива отстоит от критического сечения высотой h на расстоянии $l/h \leq 15$ при $T_0 \approx 1000$ К и на $l/h \leq 10$ при $T_0 \approx 1100$ К. По-видимому, в этом случае время пребывания частиц топлива в дозвуковой части сопла, т. е. до момента резкого падения температуры потока, меньше времени задержки воспламенения. Исследование времени реакции и задержки воспламенения пропана [6] в ударной трубе показывает, что для температуры $1000 \div 1200$ К это время порядка 10^{-3} с.

Поскольку время релаксации уровня (001) молекулы углекислоты при параметрах газа в критическом сечении сопла порядка $10^{-6} \div 10^{-7}$ с, то и время смешения реагентов и время воспламенения смеси должно быть такого же порядка. Для получения времени задержки воспламенения в $\sim 10^{-6}$ с необходимо нагреть горючую смесь до температуры $1700 \div 2000$ К. Очевидно, что нагревать предварительно весь воздух и топливо до такой высокой температуры в стационарной установке весьма сложно, да и не нужно. Целесообразно сделать стабилизатор, которым может быть рециркуляционная зона течения за плохо обтекаемым телом.

Поскольку в такой рециркуляционной зоне температура продуктов сгорания близка к адиабатической температуре пламени [7], то время задержки воспламенения может уменьшиться до величины 10^{-6} с. В этом случае время сгорания будет определяться временем перемешивания топлива и воздуха. Наличие рециркуляционной зоны будет также способствовать ускорению турбулентного перемешивания, так как за стабилизатором пламени пульсационная скорость может достигать скорости основного потока [8].

Результаты экспериментов со стабилизатором пламени — стальной пластинкой,

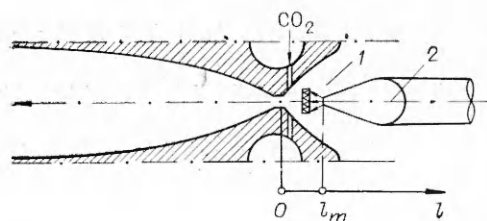


Рис. 1.

установленной на форсунке перед щелью для ввода топлива (см. рис. 1, 1), показаны на рис. 2, где приведена характерная кривая изменения температуры торможения потока в процессе пуска с горением топлива. На графике хорошо видно начало поджигания и горение топлива, характеризуемое резким увеличением температуры торможения потока. Со стабилизатором пламени устойчивое горение топлива наблюдалось вплоть до положения места ввода $l/h = 4$.

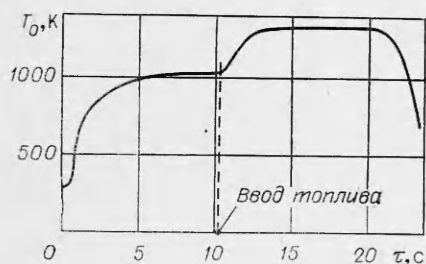


Рис. 2.

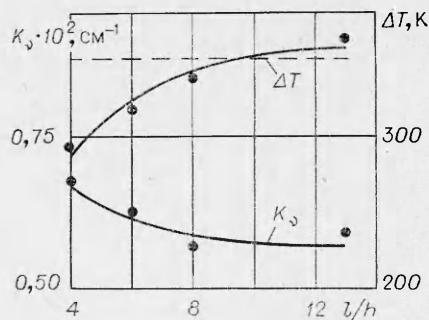


Рис. 3.

На рис. 3 показана зависимость коэффициента усиления слабого сигнала K_v и измеренного хромель-алюмелевой термопарой прироста температуры торможения в сверхзвуковом потоке от расстояния ввода топлива от критического сечения сопла при температуре воздуха $T_0 \approx 1000$ К и давлении $p_0 \approx 9$ атм. Расходы воздуха, пропана и углекислого газа в этих пусках поддерживались постоянными и были равны соответственно 280, 1,5 и 45 г/с. Значение коэффициента усиления K_v в период пуска перед вводом топлива не зависит от положения ввода и равно $K_v^0 \approx 0,3 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1}$.

После ввода топлива коэффициент усиления возрастает за счет прироста температуры при горении топлива и увеличивается по мере приближения места ввода к критическому сечению сопла. Это увеличение обусловлено дополнительной сверхравновесной подкачкой колебательных уровней молекулы углекислоты при горении в околосопловой области сопла. Аналогичные зависимости коэффициента усиления от места ввода пропана наблюдались и при других значениях T_0 , p_0 и расходах пропана.

Прирост температуры ΔT , измеренный термопарой в сверхзвуковом потоке, близок к рассчитанному по количеству вводимого топлива (штриховая кривая на рис. 3) и несколько уменьшается при приближении места ввода к критическому сечению. По-видимому, по мере приближения места ввода к критическому сечению увеличивается неполнота сгорания топлива, которое не успевает прореагировать при обтекании термопары сверхзвуковым потоком.

Поступила в редакцию
24/V 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Лосев, Газодинамические лазеры, М., Наука, 1977.
2. Н. Г. Басов, В. В. Громов и др. Квантовая электроника, 1976, 3, 5.
3. И. С. Заслонко, С. М. Когарко, Ю. В. Чириков. ПМТФ, 1973, 2, 48.
4. Н. И. Кудрявцев, С. С. Новиков, И. Б. Светличный. ИФЖ, 1978, XXXV, 6.
5. В. Г. Ефимов, Л. А. Заклязьминский. ФГВ, 1979, 15, 1.
6. В. Ф. Мюес, Е. Р. Bartlef. AIAA J., 1969, 7, 10.
7. Б. Льюис, Г. Эльбе. Горение, пламя и взрывы в газах, М., Мир, 1969.
8. Е. С. Щетинков. Физика горения газов, М., Наука, 1965.

О ВЛИЯНИИ ПУЛЬСАЦИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАМЕНИ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ ОКСИДА АЗОТА

Ю. А. Попов
(Свердловск)

По теории Зельдовича [1, 2] образование оксида азота идет путем расщепления молекулы азота при взаимодействии с атомом кислорода. Механизм реакции цепной, а атомы кислорода находятся в равновесии с окружающей средой. Наиболее простой механизм образования атомов кислорода:



хотя в присутствии соединений с содержанием кислорода могут быть и другие ка-