

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. В. Новожилов. Нестационарное горение твердых ракетных топлив. М., Наука, 1973.
2. С. Милфейт, А. Баер, Н. Райан. РТК, 1972, 10, 10.
3. О. Я. Романов, В. С. Тархов, Г. Г. Шелухин. ФГВ, 1977, 13, 6.
4. В. С. Илюхин, П. Ф. Похил. ФГВ, 1971, 7, 3.
5. И. Б. Светличный, А. Д. Марголин, П. Ф. Похил. ФГВ, 1971, 7, 2.
6. Э. И. Максимов. ЖФХ, 1963, 37, 5.
7. В. Е. Зарко, Г. И. Леонов, В. Г. Григорьев. Физика горения и методы ее исследования. ЧГУ, Чебоксары, 1975, 4, 27.
8. Я. Б. Зельдович, О. И. Лейпунский, В. Б. Либрович. Теория нестационарного горения пороха. М., Наука, 1975.
9. В. Ф. Михеев, С. М. Борин. ФГВ, 1973, 9, 2.
10. А. А. Мельников. Теория и расчет фотозатворов. М., Машиностроение, 1973.
11. А. А. Зенин, Б. В. Новожилов. ФГВ, 1973, 9, 2.
12. И. Г. Ассовский. Канд. дис. М., ИХФ АН СССР, 1973.
13. Э. В. Конев. Канд. дис. Новосибирск, ИХИГ СО АН СССР, 1967.

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА СМЕШЕНИЯ СТРУЙ ГАЗОВ В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ И ЕГО ВЛИЯНИЯ НА ИНВЕРСНУЮ НАСЕЛЕННОСТЬ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Б. Г. Ефимов, Л. А. Заклязьминский
(Москва)

В работе [1] теоретически обоснована высокая эффективность получения инверсной населенности молекул при мгновенном смешении потока термически возбужденного вспомогательного газа (типа N_2) с потоком холодного рабочего газа (например, CO_2). Эксперименты [2—4] показали, что величина инверсной населенности молекул рабочего газа (или коэффициента усиления) в значительной мере определяется процессом турбулентного перемешивания потоков вспомогательного и рабочего газов в сверхзвуковом сопле.

В последнее время выполнено большое количество экспериментальных исследований, в которых изучалось влияние характера смешения рабочего и вспомогательного газов в сопле Лавалья на коэффициент усиления в сверхзвуковом потоке. При этом, как правило, рассматривался или поперечный ввод рабочего газа в сверхзвуковой поток [5, 6], или ввод рабочего газа в слутный сверхзвуковой поток вспомогательного газа [7]. Однако ввод рабочего газа, по-видимому, не отвечает полностью требованиям идеального смешения, которые можно сформулировать в виде:

- 1) достижение максимального значения инверсной населенности равномерно по поперечному сечению потока на выходе из сопла;
- 2) получение однородных по сечению параметров потока (и состава смеси) без ударных волн на выходе из сопла;
- 3) охлаждение стенок сопла, особенно в окрестности его критического сечения;
- 4) минимальные потери полного давления на смешение газов. Чтобы представить возможность выполнения всех этих требований, необходимо кратко рассмотреть характер смешения струи газа, вводимой параллельно или под углом в поток другого газа.

Поскольку размеры сопла для получения значительной инверсии обычно невелики (высота критического сечения сопла $h_* = 0,3 \div 1,0$ мм), то и ввод рабочего газа (углекислоты) осуществляется, как правило, через отверстия с поперечным размером $d \leq 1$ мм, при этом течение в струе рабочего газа на выходе из канала, как показывают эксперимен-

тальные данные, ламинарное. Поэтому при вводе струи рабочего газа в спутный поток вначале имеется участок струи с ламинарным течением, затем ниже по потоку появляются крупные вихри, которые переходят далее в неупорядоченное турбулентное течение [8]. Длина переходного участка от капалового течения к развитому турбулентному определяется условиями истечения.

Интенсивное перемешивание газов начинается лишь после установления в струе неупорядоченного турбулентного течения. На начальном и переходном участках также осуществляется турбулентное смешение (при турбулентном течении вспомогательного газа), но поверхность перемешивания определяется поверхностью струи рабочего газа. При установлении неупорядоченного турбулентного течения в струе за счет перемежаемости, т. е. взаимопроникновения крупных молей в зоне смешения, увеличивается поверхность контакта перемешиваемых газов и возможность передачи колебательной энергии от одного газа к другому. Тем не менее смешение при вводе рабочего газа в спутный поток вспомогательного газа на выходе из сопла происходит на очень большой длине, равной по порядку величины $50 \div 100$ размерам выходного сечения сопла [9]. Поэтому при подмешивании углекислоты в спутный поток на выходе из плоского сопла получено невысокое среднее значение коэффициента усиления. Лишь уменьшение выходного сечения сопла в решетке осесимметричных сопел (screen nozzle) [10, 11] позволило получить практически однородный поток и большой коэффициент усиления на расстоянии от решетки, меньшем длины релаксации уровней ($00^\circ 1$) молекулы CO_2 и колебательно возбужденного азота.

Для получения потока с инверсной населенностью необходимо, чтобы отношение времени турбулентного смешения τ ко времени τ_p релаксации уровней ($00^\circ 1$) CO_2 и N_2^* (1) в сверхзвуковом потоке за соплом было меньше единицы. Отсюда

$$y_i < (\tau_p \cdot D_i)^{1/2},$$

где y_i — характерная длина турбулентной диффузии; D_i — коэффициент турбулентной диффузии. Для условий: $p \approx 40 \div 50$ мм рт. ст., $T \approx 250 \div 300$ К, $r_{\text{N}_2} \approx 0,8$, $r_{\text{CO}_2} \approx 0,2$, $r_{\text{H}_2\text{O}} \approx 0,01$, $\tau_p \approx 10^{-3}$ с. Оценка коэффициента турбулентной диффузии по фотографически определенной границе вводимой струи CO_2 дает величину $D_i \approx 100 \div 500$ см²/с, тогда $y_i < 0,7$ см, т. е. для получения равномерного перемешивания на длине, значительно меньшей длины релаксации уровней ($00^\circ 1$) CO_2 и N_2^* (1), расстояние между точками ввода должно быть меньше 1 см, что и выполняется в решетке осесимметричных сопел.

В плоском сопле высокие значения коэффициента усиления достигнуты в результате перемещения точек ввода рабочего газа вверх по потоку к критическому сечению сопла и уменьшения расстояния между точками ввода. В [7] смесь углекислоты и гелия подавалась через отверстия по центральной линии сопла, в [5] — через щели в стенках сопла. Однако распределение углекислоты на выходе из сопла в обоих случаях оставалось неравномерным. В [12] равномерность распределения рабочего газа в потоке достигнута при использовании сопла с вертикально расположенными в критическом сечении трубочками. Но такая конструкция не позволяет выдерживать с большой точностью как критическое сечение сопла (особенно при $\dot{h}_* = 0,3 \div 0,5$ мм), так и профиль сверхзвуковой части сопла, необходимый для получения равномерного потока в резонаторе.

Ввод рабочего газа под углом к направлению сверхзвукового потока неизбежно приводит к возникновению ударных волн [13]. Из-за низкого статического давления в сверхзвуковом потоке струя на выходе из отверстия, как правило, звуковая и недорасширенная. В потоке вспо-

могательного газа она расширяется до сверхзвуковых скоростей с образованием всякого бочкообразного скачка, заканчивающегося диском Маха. Во вспомогательном газе перед струей возникает ударная волна, вызванная взаимодействием струй. При этом относительная глубина проникновения струи (j/d) определяется практически отношением давления рабочего газа в струе на выходе к давлению вспомогательного газа за прямым скачком уплотнения. Поскольку это давление в сопле сильно падает с ростом числа Маха набегающего потока, то глубина проникновения струи рабочего газа увеличивается при сдвиге точки ввода вниз по течению вспомогательного газа (в сторону увеличения M).

Обмен нормальной составляющей количества движения происходит лишь в непосредственной близости от точки вдува, и прежде чем начинается заметное смешение, потоки вспомогательного и рабочего газов становятся практически параллельными. Поэтому, несмотря на трехмерный характер течения газов вблизи места ввода (при вводе струи под углом к основному потоку) [14], смешение струй близко к таковому для спутных потоков. На начальном участке струя ламинарна (при малом отверстии ввода), затем образуются два крупных вихря, после чего в струе устанавливается развитое турбулентное течение, и смешение усиливается за счет перемежаемости. Расстояние по потоку от точки ввода струи до сечения, где возникает развитое турбулентное течение, т. е. существенное усиление перемешивания, составляет примерно $6 \div 7$ калибров (диаметров отверстия ввода) [15].

Недостаток ввода рабочего газа в сверхзвуковой поток вспомогательного газа состоит также в слабом охлаждении стенок сопла в окрестности критического сечения, где тепловые потоки очень велики, при высоких температурах торможения ($T_0 = 2000 \div 3000$ К).

На основании изложенного представляется целесообразным рассмотреть ввод рабочего газа в дозвуковой области сопла. Очевидно, что положение точек ввода должно быть таким, чтобы смешение потоков газа осуществлялось тем не менее в сверхзвуковой части сопла, где статическая температура вспомогательного газа настолько низка, что нижний уровень (10°O) CO_2 при смешении практически не заселяется. Возможность выполнения этого условия обусловлена как описанным выше характером смешения струи газа, так и формой сопел, используемых для получения потоков с инверсной населенностью молекул рабочего газа. В сопле минимальной длины число M быстро увеличивается за критическим сечением и на расстоянии трех-четырех «полукритик» достигает значения $M = 3,0$, так что даже при малом отверстии ввода интенсивное смешение струи газа, вводимой в дозвуковой поток, будет происходить уже в сверхзвуковом потоке.

Этот вывод подтверждается экспериментальными результатами. На рис. 1 представлены зависимости коэффициента усиления слабого сигнала от мольного содержания $r_{\text{H}_2\text{O}}$ воды в вспомогательном газе при вводе CO_2 через отверстия $d = 1$ мм в критическом сечении (кривая 2)

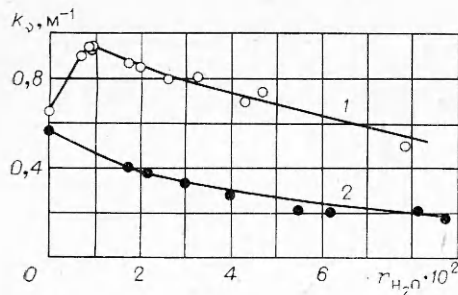


Рис. 1.

и на расстоянии 3 мм от критического сечения в дозвуковой области (кривая 1), полученные при $p_0 = 10^6$ Па, $T_0 = 1500$ К, $r_{\text{CO}_2} \approx 0,10 \div 0,12$, $h = 1,2$ мм [16]. Видно, что поведение k_v при малых значениях $r_{\text{H}_2\text{O}}$ совершенно различно. При вводе CO_2 в критическом сечении максимум коэффициента усиления наблюдается при $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0$, а при вводе в дозвуковой области сопла — при $r_{\text{H}_2\text{O}} \approx 0,01$, и затем k_v уменьшается при $r_{\text{H}_2\text{O}} \rightarrow 0$.

Такой характер поведения коэффициента усиления можно объяснить тем, что интенсивное смешение струй вводимого газа начинается в сверхзвуковой области. Поскольку в первом случае коэффициент усиления максимален при отсутствии воды в смеси, смешение происходит в области сопла, где статическая температура газа настолько низка, что уровень (10°O) CO_2 практически не заселяется, т. е. $T \lesssim 500 \text{ K}$. Небольшой сдвиг точки ввода в дозвуковую область приводит к тому, что интенсивное смешение начинается при температуре потока, достаточной для некоторого заселения уровня (10°O) CO_2 , приводящего к уменьшению коэффициента усиления при малых $r_{\text{H}_2\text{O}}$. Для углекислоты это произойдет при $T \simeq 500 \div 600 \text{ K}$. Из анализа распределения статической температуры и числа M потока по длине сопла для одномерного течения при $\kappa = 1,4$ видно, что расстояние от точки ввода в дозвуковой области до сечения, где $T \simeq 600 \text{ K}$, равно $\sim 6 \div 7$ диаметрам отверстия ввода. На расстоянии $\sim (6-7) d$ от критического сечения $T \simeq 450 \text{ K}$. При этой температуре уровень (10°O) CO_2 практически не заселяется, и максимум коэффициента усиления сдвигается к $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0$.

Из сказанного можно сделать вывод, что при вводе CO_2 через круглые отверстия с $d \simeq 1 \text{ мм}$ в окрестности критического сечения сопла минимальной длины нормально к направлению потока вспомогательного газа интенсивное перемешивание струи на молекулярном уровне начинается примерно на расстоянии $6 \div 7 \text{ мм}$ от точки ввода, т. е. уже в сверхзвуковом потоке при $M \simeq 3 \div 4$. Однако небольшой сдвиг точки ввода в дозвуковую область сопла еще не решает проблемы получения равномерно перемешанного потока рабочего и вспомогательного газов на выходе из сопла. В работе [16] показано, что ввод CO_2 только через круглые отверстия в стенках сопла или по оси сопла в дозвуковой области на оптимальном расстоянии от критического сечения не обеспечивает равномерного распределения углекислоты на выходе из сопла по его высоте.

При вводе CO_2 на значительном расстоянии от критического сечения ($i \geq 25 \text{ н.к.}$) распределение CO_2 в потоке становится равномерным, но величина коэффициента усиления при этом мало отличается от значений, характерных для течения предварительно перемешанной смеси газов. Только уменьшение расстояния между точками ввода по высоте сопла в два раза, т. е. совместный ввод CO_2 как через отверстия в стенках сопла, так и по его центральной линии на расстоянии $l = 2 \div 5 \text{ мм}$ от критического сечения обеспечил практически равномерное распределение углекислоты по поперечному сечению на выходе из сопла и высокий уровень инверсной населенности.

Ясно, что ввод углекислоты через отверстия в стенках в дозвуковой области создает хорошее охлаждение стенок сопла в критической области, так как по поверхности сопла течет слой холодного газа. Такой ввод обеспечивает также получение высоких значений коэффициента усиления. Однако сравнение различных методов ввода провести трудно. Эксперименты, как правило, выполнялись при различных размерах сопел, параметрах и составе газов, либо в работах приводятся только максимальные значения k_v в поперечном сечении сопла.

Пример сравнения приведен на рис. 2. Здесь 1 — экспериментальные точки, полученные при вводе CO_2 в возбужденный газ (воздух + H_2O) через отверстия в стенках сопла и одновременно по центральной линии сопла в дозвуковой области [16]; 2 — точка, полученная путем осреднения распределения k_v по соплу из работы [5] при вводе углекислоты и гелия через щели в стенках в сверхзвуковой области сопла; 3 и 4 — дозвуковой и сверхзвуковой контуры сопла соответственно. Видно, что средние значения коэффициента усиления по ширине сопла при оптимально выбранном дозвуковом комбинированном вводе и при примерно одинаковых параметрах вспомогательного газа ($T_0 =$

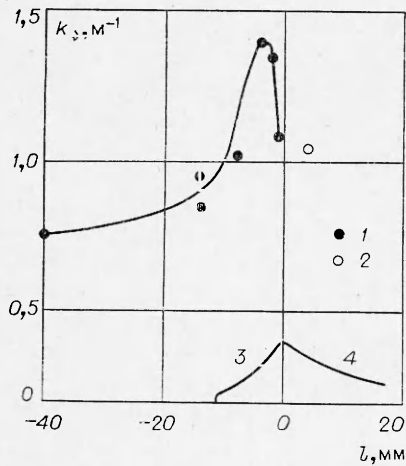


Рис. 2.

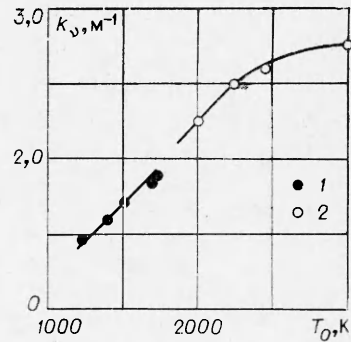


Рис. 3.

$= 1700 \text{ K}$; $p_0 = 10^6 \text{ Па}$) и $h_* = 1,2 \text{ мм}$ выше, чем при вводе рабочего газа в сверхзвуковой области через щели в стенках сопла.

На рис. 3 приведены результаты исследований коэффициента усиления в зависимости от температуры торможения вспомогательного газа для двух систем ввода, обеспечивающих получение равномерного распределения рабочего газа в сверхзвуковом потоке. Экспериментальные точки 1 получены при комбинированном вводе углекислоты в дозвуковой части плоского сопла в нагретый азот, содержащий $\sim 1\%$ воды, точки 2 — при вводе углекислоты и гелия в спутный сверхзвуковой поток азота за решеткой осесимметричных сопел [17]. Видно, что все точки ложатся практически на одну кривую, т. е. при вводе рабочего газа в дозвуковой области перед критическим сечением сопла интенсивное смешение также происходит в сверхзвуковом потоке при низкой статической температуре.

С учетом рассмотренных выше особенностей ввода и характера смешения комбинированный ввод рабочего газа в дозвуковой области сопла вблизи критического сечения представляется наиболее предпочтительным, так как, во-первых, он обеспечивает получение практически равномерного распределения концентрации CO_2 на выходе из сопла одновременно с высоким средним значением коэффициента усиления. Во-вторых, стенки сопла хорошо охлаждаются как течением холодного

газа по каналам внутри сопла, так и тепловой завесой в окрестности критического сечения. В-третьих, при вводе струи рабочего газа не возникают ударные волны, а смешение практически начинается при минимально необходимом числе $M \approx 3,0$, что способствует также уменьшению потерь полного давления.

В экспериментах, описанных в [16], использовались решетки сопел с $h_* = 0,8$ и $1,2 \text{ мм}$. Однако больший практический интерес представляют сопла с $h_* = 0,3$ и $0,5 \text{ мм}$. Выполнение для таких сопел комбинированного ввода с сохранением заданного положения точек ввода во время работы, т. е. при нагреве конструкции, представляется очень трудной задачей. Поэтому подмешивание рабочего газа целесообразно осуществлять только через отверстия в стенках сопел, при этом отверстия для

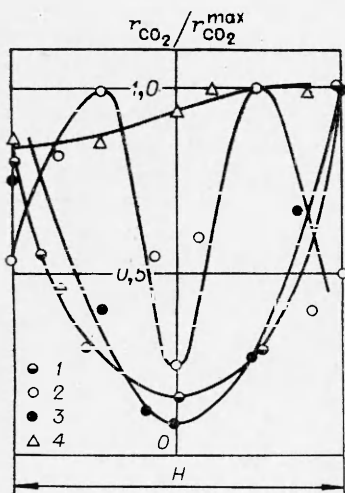


Рис. 4.

поперечного ввода газа должны располагаться в окрестности критического сечения сопла. Поскольку глубина проникновения для данной формы отверстия определяется отношением скоростных напоров, а обеспечить высокое значение pu или pu^2 для рабочего газа трудно из-за относительно малого количества вводимого газа ($\leq 20\%$) и большого числа отверстий ввода (к тому же вспомогательный газ имеет максимальный скоростной напор в критическом сечении сопла), то необходимую глубину проникновения струи рабочего газа можно обеспечить перемещением точки ввода в дозвуковую или сверхзвуковую область сопла вблизи критического сечения, использованием соответствующей формы дозвуковой части сопла, а также выбором формы отверстия.

На рис. 4 показаны профили концентрации CO_2 , измеренные в выходном сечении сопла при вводе CO_2 через круглые отверстия на разных расстояниях от критического сечения сопла и через отверстия различной формы. Кривая 1 — ввод через круглые отверстия $d=1$ мм в критическом сечении сопла, 2, 3, 4 — ввод в дозвуковой области сопла на расстоянии ~ 2 мм от критического сечения соответственно через круглые отверстия $d=1$ мм, поперечные и продольные щели. Видно, что продольные щели (отношение сторон 5:1) обеспечивают большую глубину проникновения и близкое к равномерному распределение CO_2 в сверхзвуковом потоке на выходе из сопла.

Поступила в редакцию
5/VII 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Басов, А. Н. Ораевский, В. А. Щеглов. ЖТФ, 1970, 40, 1.
2. I. Milewski, M. Brunn et al. Bull. Acad. Polon. Sci., 1972, 20, 4.
3. B. R. Bronfin, L. R. Voedeker, J. P. Cheyer. Appl. Phys. Lett., 1970, 16, 5.
4. V. N. Croshko, R. I. Soloukhin, P. Wolanski. Optics Communications, 1972, 6, 3.
5. В. Н. Крошко, Р. И. Солоухин, Н. А. Фомин. ФГВ, 1974, 10, 4.
6. Н. Н. Остроухов, Б. К. Ткаченко. Квантовая электроника, 1978, 5, 4.
7. R. Borghi, A. F. Carrega et al. Appl. Phys. Letters, 1973, 22, 12.
8. Турбулентное смешение газовый струй. Под ред. Г. Н. Абрамовича. М., Наука, 1974.
9. R. Borghi, M. Charpenel. Astronautica Acta, 1972, 17, 4, 5.
10. D. A. Russell, S. E. Neice, P. H. Rose. AIAA J., 1975, 13, 5.
11. P. E. Cassady, J. F. Newton, P. H. Rose. AIAA J., 1978, 16, 4.
12. А. В. Крауклис, В. Н. Крошко и др. ФГВ, 1976, 12, 5.
13. В. С. Авдеевский, К. И. Медведев, М. П. Полянский. Изв. АН СССР, МЖТ, 1970, 5.
14. S. V. Patankar, D. K. Basu, S. A. Alpay. Transactions of ASME, J. of Fluids Engineering, 1977, 99, 758.
15. J. A. Schetz, A. Padhye. AIAA J., 1977, 15, 10.
16. Б. Г. Ефимов, Л. А. Заклязьминский. ФГВ, 1979, 15, 1.
17. P. Hoffmann, H. Hügel, W. Schall. AIAA J., 1977, 15, 10.

СПЕКТРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЗБУЖДЕННЫХ МОЛЕКУЛ СО В СЕРОУГЛЕРОДНОМ ПЛАМЕНИ

В. А. Дудкин

(Москва)

Инфракрасные спектры сероуглеродного пламени изучались в [1—5] в связи с проблемой получения стимулированного излучения при химических реакциях. В [1, 2] выяснено, что в зоне химической реакции пламени газовой смеси CS_2-O_2 при низких давлениях имеет место не-