

ций и матричные элементы дипольного момента, такое расхождение следует признать удовлетворительным. Отметим, что основная причина различия результатов состоит, по-видимому, в наличии поперечного градиента давления, который связан со значительным тепловыделением в области протекания экзотермических реакций (он не учитывается в настоящей работе). В связи с этим можно ожидать, что в режиме генерации, когда часть энергии отводится в виде излучения, расхождение с точным решением уменьшится.

В заключение сформулируем основные результаты настоящей работы.

1. Получены зависимости интегральных характеристик НФ-химического лазера непрерывного действия от определяющих параметров. Эти результаты позволяют дать рекомендации по оптимизации режимов работы лазера.

2. Проведено сравнение зависимости КПД от температуры в форкамере с данными, полученными на основе квазиодномерной модели [8]. Несмотря на качественное совпадение характера этих зависимостей, двумерная модель предсказывает меньший относительный выигрыш при переходе к малым начальным степеням диссоциации фтора.

3. Сравнение с точными решениями полной системы уравнений Навье—Стокса [11] показало, что по крайней мере при больших степенях разбавления использованная модель дает достаточно хорошие результаты.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность профессору Ю. В. Лапину и М. Х. Стрельцу за многочисленные полезные обсуждения результатов работы.

*Поступила в редакцию
23/1 1978*

ЛИТЕРАТУРА

1. J. C. Polanyi. J. Chem. Phys., 1961, 4, 1, 347.
2. T. A. Cool, R. R. Stephens, T. J. Falk. Int. J. Chem. Kinetics, 1969, 1, 9, 495.
3. Н. Г. Басов, В. В. Громов и др. Письма в ЖЭТФ, 1971, 13, 9, 496.
4. W. S. King, H. Mirels. AIAA J., 1972, 10, 12, 1647.
5. R. Tripodi, I. J. Coulter a. o. AIAA J., 1975, 13, 6, 776.
6. В. И. Головичев, Н. Г. Преображенский. ФГВ, 1977, 13, 3, 366.
7. G. Emanuel. J. QSRT, 1973, 13, 12, 1365.
8. В. Г. Крутова, А. Н. Ораевский и др. Квантовая электроника, 1976, 3, 9, 1919.
9. W. L. Shackleford, A. B. Witte, J. E. Broadwell. AIAA J., 1974, 12, 8, 1009.
10. Л. Г. Лойцянский. Механика жидкости и газа. М., «Наука», 1973.
11. A. P. Kothari, J. D. Anderson, E. Jones. AIAA J., 1977, 15, 1, 92.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ СМЕШЕНИЯ В СОПЛЕ ЛАВАЛЯ НА КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

Б. Г. Ефимов, Л. А. Заклязьминский

(Москва)

В последнее время выполнено большое количество экспериментальных исследований по изучению влияния газодинамических условий смешения потоков рабочего и вспомогательного газов на инверсную населенность молекул рабочего газа. Эти исследования подтвердили тео-

ретический вывод [1] о возможности получения более высокой инверсии при подмешивании углекислоты в поток расширяющегося в сопле термически возбужденного вспомогательного газа (азота) по сравнению с расширением предварительно подготовленной смеси. Действительно, в работах [2, 3] при вводе углекислоты и гелия в нагретый до температуры $T_0 \approx 3000$ К азот достигнут коэффициент усиления малого сигнала $k_{\nu} \approx 3$ м⁻¹.

Более высокая эффективность получения инверсной населенности при течении газа в сверхзвуковом сопле с подмешиванием к вспомогательному холодному рабочему газу обусловлена тем, что: а) оптимальное значение коэффициента усиления получается при больших температурах вспомогательного газа ($T_0 = 2000 \div 4000$ К), т. е. с большим запасом колебательной энергии в нем; б) уменьшаются затраты энергии на предварительный нагрев CO_2 .

Наиболее оптимальным с точки зрения получения максимальной инверсии представляется ввод рабочего газа в сверхзвуковой поток вспомогательного газа равномерно по его сечению. Практически же осуществить это невозможно, так как расположение большого числа точек ввода в сверхзвуковом потоке приведет к возникновению ударных волн, а возможно, и к запираанию потока. Выполнить теоретический анализ течения в сопле с подмешиванием холодного газа в настоящее время не представляется возможным из-за большой сложности системы уравнений газодинамики с учетом турбулентного смешения и кинетики колебательного энергообмена, а также отсутствия надежных данных о процессе турбулентного смешения в этих условиях.

В связи с этим выполнены экспериментальные исследования эффективности различных схем ввода холодного рабочего газа в поток вспомогательного газа в сверхзвуковом сопле: 1) смешение спутных сверхзвуковых потоков углекислоты и азота в канале постоянного сечения за соплом [4, 5]; 2) ввод углекислоты в сформировавшийся сверхзвуковой поток азота перпендикулярно направлению течения [6]; 3) ввод углекислоты через щели в стенках плоского сопла в закритической его части с последующим расширением потока [3, 7]; 4) ввод углекислоты в окрестности критического сечения сопла через щели, расположенные в плоскости симметрии сопла [2, 8].

Для получения равномерного смешения на выходе из сопла рабочего газа и вспомогательного выполнены эксперименты, в которых углекислота вводилась через трубки с отверстиями, вставленные в критическое сечение сопла [9]. Однако в этих экспериментах еще не решен достаточно полно вопрос о выборе места ввода рабочего газа и его характере для получения равномерно перемешанного потока на выходе из сопла и оптимального значения коэффициента усиления. Система трубок, располагаемых в критическом сечении сопла [9], по-видимому, обеспечивает достаточно хорошее перемешивание компонентов газа, но практически трудно реализуема при малых значениях высоты h_* критического сечения сопла ($h_* \approx 0,5$ мм) и при большом расходе газа, когда вместо одного сопла используется целый блок — решетка сопел.

Кроме того, во всех указанных экспериментальных работах в качестве вспомогательного газа использовался азот или воздух, нагретый электрической дугой или в ударной волне, а углекислый газ вводился в смеси с гелием. Поскольку наиболее доступный способ нагрева большого количества вспомогательного газа — сжигание какого-либо топлива (например, $\text{CO} + \text{H}_2$, керосина, бензола) в воздухе, то целесообразно исследовать подмешивание рабочего газа (чистой углекислоты) в вспомогательный газ, близкий по составу к продуктам сгорания топлива, т. е. содержащий некоторые количества углекислоты и воды.

Цель излагаемых ниже экспериментов — исследовать влияние мес-

та и характера ввода углекислого газа и состава вспомогательного газа на коэффициент усиления. Эксперименты выполнены с решеткой, состоящей из четырнадцати плоских сопел с $h_* = 1,2$ мм и общей площадью поперечного сечения потока газа на выходе 30×300 мм². Сверхзвуковая часть сопел минимальной длины (с угловой точкой) рассчитана на получение числа $M = 4,5$ при параметрах торможения $p_0 = 2 \cdot 10^6$ Па, $T_0 = 1400$ К [10]. Вспомогательным газом служил воздух, в который на большом расстоянии от решетки добавлялась вода, а в качестве рабочего газа использовалась углекислота.

Углекислота вводилась только в дозвуковой части сопла. Предполагалось, что подмешивание CO_2 в сверхзвуковой части не может быть эффективным, так как турбулентное смешение двух параллельных сверхзвуковых потоков из-за малости величины отношения интенсивности турбулентности к средней скорости $\left(\frac{(\overline{u'^2})^{1/2}}{u} \simeq 0,01 - 0,02 \right)$ происходит на относительно большой длине

$$L = \frac{h^2 \omega}{4l (\overline{u'^2})^{1/2}} \simeq 10^2 h \quad (\text{при } l = 0,1h), \quad (1)$$

где h — высота сопла на выходе, а l — длина пути смешения. Ввод же струи с большим количеством движения под углом к сверхзвуковому потоку вспомогательного газа приведет к возникновению интенсивных ударных волн.

В общем случае турбулентное перемешивание струи рабочего газа с вспомогательным осуществляется таким образом, что вначале происходит взаимопроникновение крупных турбулентных молей с последовательным их «дроблением» на более мелкие. Поскольку передача колебательной энергии от вспомогательного газа к рабочему происходит только при столкновениях на молекулярном уровне, то она в основном будет осуществляться тогда, когда произойдет турбулентное смешение до молей минимального размера, которые будут перемешиваться уже путем молекулярной диффузии.

Наименьшую длину пути, которую пройдут частицы рабочего газа от места их ввода до смешения на уровне молей минимальных размеров, можно грубо оценить по формуле (1), если предположить, что $h/2 = h_*$, а в области ввода рабочего газа образуются срывные зоны, и тогда $l \simeq h_*$, а $(\overline{u'^2})^{1/2} \simeq u$ [11]. В этом случае $L_{\min} \simeq h_*$, а наибольшая длина будет тогда по порядку величины $L_{\max} \simeq 10^2 h_*$.

Из этих качественных соображений и грубых оценок следует, что если система ввода рабочего газа установлена в дозвуковой части сопла на расстоянии $(0 \div 10) h_*$ от критического сечения вверх по потоку, то смешение от молей минимального размера до молекулярного уровня с передачей колебательной энергии от вспомогательного газа к молекулам рабочего газа будет происходить практически уже в сверхзвуковом потоке. Это обстоятельство определило выбор системы подмешивания CO_2 , схема которой изображена на рис. 1. Рабочий газ подавал-

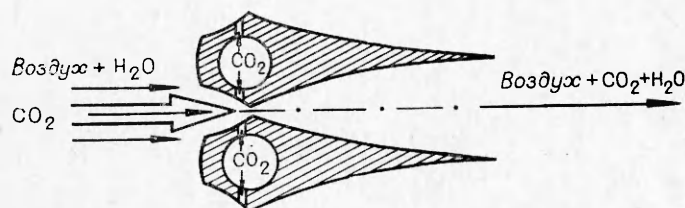


Рис. 1. Схема комбинированного ввода CO_2 в поток вспомогательного газа.

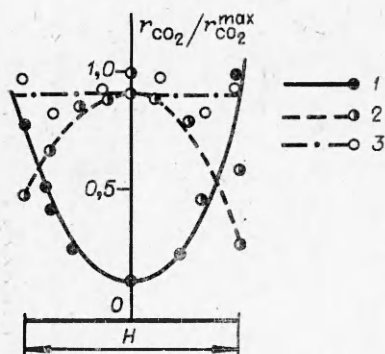


Рис. 2. Распределение относительной концентрации $r_{\text{CO}_2}/r_{\text{CO}_2}^{\text{max}}$ по высоте H потока на выходе из сопла.

ся через отверстия в стенках сопел, расположенных на расстоянии ~ 3 мм от критического сечения, а также через щели, размещенные по центральным линиям сопел по всей их высоте. Устройство с щелями могло перемещаться вдоль потока на расстояние от 1 до ~ 50 мм от критического сечения.

Контроль за распределением концентрации углекислоты в сверхзвуковом потоке на выходе из решетки сопел проводился косвенно — по падению температуры торможения потока, вызываемому вводом холодного CO_2 в нагретый поток воздуха. Температура торможения измерялась с помощью экранированных хромель-алюмелевых термопар. Концентрация CO_2 оценивалась на основе измеренных температур из уравнения теплового баланса в предположении, что распределения концентраций и температур подобны. Распределение полученных таким образом и отнесенных к их максимальным значениям концентраций CO_2 на выходе из сопла по его высоте показано на рис. 2, 1 — при вводе холодной углекислоты через отверстия в стенках сопла, на рис. 2, 2 — при вводе через щели, расположенные в плоскости симметрии сопла на расстоянии $\sim 2,5$ мм от критического сечения, и на рис. 2, 3 — при комбинированном вводе CO_2 , т. е. через отверстия в стенках сопла (60% углекислоты) и через щели одновременно. Видно, что ввод углекислоты только через отверстия в стенках сопла либо только через центральные щели не позволяет получить равномерного распределения ее концентрации по поперечному сечению потока на выходе из сопла.

Коэффициент усиления слабого сигнала измерялся по приращению интенсивности пучка диагностического CO_2 -лазера при его прохождении через сверхзвуковой поток газа на расстоянии ~ 10 мм от выходных кромок решетки сопел. Приемником излучения служило фотосопротивление типа «Свод».

Результаты измерений коэффициента усиления для различных схем ввода углекислоты представлены на рис. 3. Все данные получены при одних и тех же значениях давления, температуры и состава смеси. Видно, что наибольшее значение k_v достигается при комбинированном вводе CO_2 (рис. 3, 3) в соответствии с наиболее равномерным распределением концентрации CO_2 на выходе из сопла (см. рис. 2). Оптимальная точка подмешивания CO_2 находится на расстоянии $2\div 5$ мм от критического сечения в дозвуковой части сопла. При удалении точки подмешивания свыше $5\text{--}6$ мм от критического сечения коэффициент усиления вначале падает резко, а затем медленно и при удалении на ≥ 40 мм приближается к его значению для предварительной подготовленной рабочей смеси газов (в случае ввода CO_2 только через щели, расположенные в плоскости симметрии сопла). При подмешивании углекислоты

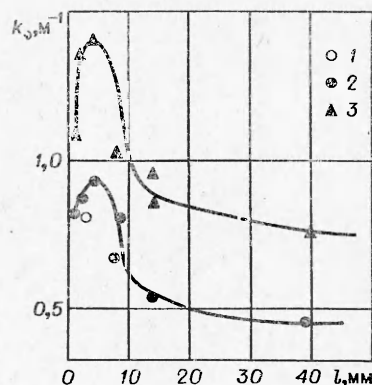


Рис. 3. Влияние положения места ввода CO_2 относительно критического сечения сопел на величину коэффициента усиления k_v .

1 — отверстия в стенках сопел; 2 — щели в плоскостях симметрии сопел; 3 — комбинированный ввод CO_2 .

Рис. 4. Зависимости коэффициента усиления от температуры торможения воздуха. 1 — экспериментальные данные для комбинированного ввода CO_2 , 2 — экспериментальные данные для ввода CO_2 через отверстия в стенках сопел; 3 — расчет для течения предварительно подготовленной смеси воздух + $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, $p_0 = 10^5$ Па; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,01$.

ты в точках, лежащих на расстоянии $l < 2$ мм от критического сечения вверх по потоку, коэффициент усиления также падает, так как CO_2 , по-видимому, не успевает достаточно хорошо перемешаться с воздухом к моменту выхода из сопла, о чем говорит некоторое увеличение коэффициента усиления в рабочей части вниз по потоку от выходных кромок решеток сопел.

На рис. 4 представлены значения коэффициента усиления в зависимости от температуры торможения воздуха в форкамере установки. Видно, что ввод холодной углекислоты приводит к существенному повышению эффективности замораживания колебательной энергии в решетке сопел и тем большему, чем выше температура вспомогательного газа.

Выполнены также эксперименты по изучению влияния содержания паров воды в вспомогательном газе (воздухе) на коэффициент усиления. На рис. 5 показаны значения k_v в зависимости от мольного содержания паров воды в газе для различных способов ввода холодной углекислоты. Кривые 1 и 2 рис. 5 получены при вводе углекислоты через отверстия в стенках сопел, при этом кривой 1 соответствует подмешивание углекислоты в начале критического сечения шириной 1 мм, а кривой 2 — подмешивание на расстоянии 3 мм от критического сечения. Кривая 3 получена при комбинированном вводе CO_2 , когда совместно с вводом через отверстия в стенках сопел углекислота подавалась еще через щели, расположенные в плоскостях симметрии сопел на расстоянии 2 мм от критического сечения. Отчетливо виден несколь-

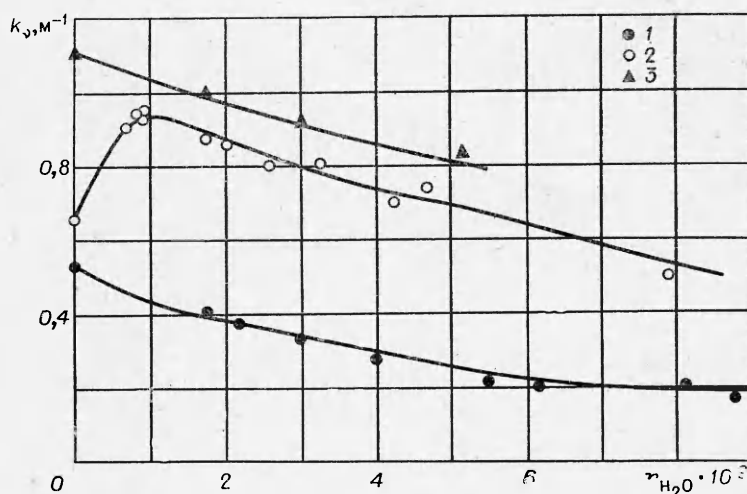
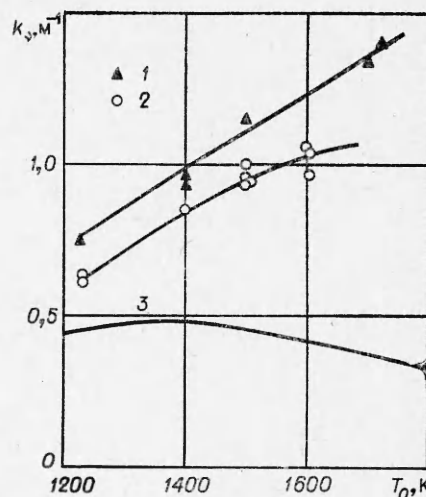


Рис. 5. Влияние содержания паров воды в смеси на коэффициент усиления; $p_0 \approx 10^5$ Па, $T_0 = 1500$ К, $r_{\text{CO}_2} \approx 0,10 \div 0,12$.

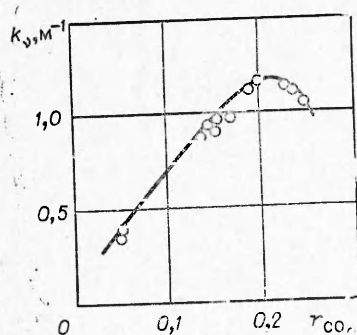


Рис. 6. Зависимость коэффициента усиления от содержания углекислоты в смеси; $p_0 \approx 10^6$ Па
 $T_0 \approx 1500$ К, $r_{H_2O} \approx 0,01$.

ко различных характер поведения кривых при малом содержании паров воды в смеси, связанный с перемещением точки ввода CO_2 вверх по потоку.

Если ввод углекислоты производится близко к критическому сечению, то уровень (100) CO_2 практически не успевает заселиться, и максимальное значение

коэффициента усиления получается при отсутствии воды в смеси. При вводе углекислоты на расстоянии $l \geq 3$ мм от критического сечения максимум коэффициента усиления получается при содержании воды $r_{H_2O} \approx 0,01$. При больших количествах водяных паров зависимость k_v от содержания их в рабочем газе аналогична таковой для предварительно подготовленной смеси. Поскольку при взаимодействии рабочего газа с электромагнитным полем в резонаторе для расселения нижнего уровня (100) CO_2 газ должен содержать некоторое количество воды, то в случае с подмешиванием углекислоты в решетке сопел оптимальное ее содержание также будет равно $0,01 \div 0,03$.

Пример зависимости коэффициента усиления от количества вводимой в решетку сопел углекислоты показан на рис. 6. Видно, что оптимальное значение относительного расхода углекислоты несколько выше, чем при предварительной подготовке смеси газов, и равно $0,2 \div 0,25$.

Авторы благодарят Г. В. Гембаржевского и В. Н. Скирду за помощь в проведении эксперимента.

Поступила в редакцию
21/III 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Г. Басов, А. Н. Ораевский, В. А. Щеглов. ЖТФ, 1970, 40, 1.
2. R. Borghi, A. F. Carrega a. o. Appl. Phys. Letters, 1973, 22, 12.
3. В. Н. Крошко, Р. И. Солоухин, Н. А. Фомин. ФГВ, 1974, 10, 4.
4. I. Milewski, M. Brunne. Bull. Acad. Polon. Sci., 1972, 20, 73.
5. R. Borghi, M. Charpenel. Astronautica Acta, 1972, 17, 4, 5.
6. B. R. Bronfin, L. R. Boedeker, J. P. Cheyer. Appl. Phys. Lett., 1970, 16, 5.
7. В. Н. Крошко, Р. Н. Солоухин. Докл. АН СССР, 1973, 211, 4.
8. J.-P. E. Tapan, M. Charpenel, R. Borghi. AIAA Paper, 1973, N 73-622.
9. А. В. Крауклис, В. Н. Крошко, Р. И. Солоухин. ФГВ, 1976, 12, 5.
10. В. П. Верховский. Тр. ЦАГИ, вып. 1680, 1975.
11. B. E. Launder, D. B. Spalding. Lectures in mathematical models of turbulence, London and New York, Acad. Press, 1972.