

УДК 621.375.826

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНОГО ГАЗА В ПРОФИЛИРОВАННОМ СОПЛЕ

А. Б. БРИТАН, Р. И. СЕРИКОВ, А. М. СТАРИК, В. М. ХАЙЛОВ

(Москва)

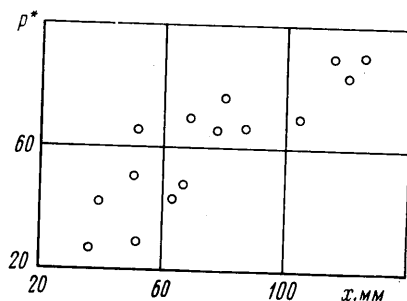
Приводятся результаты измерений коэффициента усиления в плоском профилированном сопле для смеси, содержащей углекислый газ и азот с примесями кислорода и паров воды.

В последнее время получили широкое развитие работы, посвященные исследованию колебательно-неравновесных течений в соплах газовых смесей, содержащих углекислый газ. Исследования проводились в широком диапазоне начальных условий и составов смесей для сопловых устройств различного типа. Степень неравновесности течения в подавляющем большинстве случаев оценивалась по результатам измерения коэффициента усиления слабого сигнала зондирующего CO_2 -лазера. На основании сопоставления с экспериментальными данными результатов расчета коэффициента усиления предлагались различной сложности расчетно-теоретические модели, описывающие процесс колебательно-энергообмена молекул в исследованных условиях [1].

Следует отметить, что геометрия используемых сопловых устройств существенно влияет на условия проведения измерений. Например, щелевые клиновидные сопла, широко используемые в экспериментах на ударных трубах [2], выполняют обычно с относительно небольшим углом раскрытия сверхзвуковой части, что обусловлено стремлением получить течение, достаточно корректно описываемое одномерной схемой расчета [3]. Это приводит к сравнительно малым скоростям охлаждения газа и ограничивает возможности эксперимента при исследовании течений газовых смесей с большими скоростями релаксации, например, при повышенных начальных температурах либо при большом содержании H_2O или He в смеси [1]. Исследование неравновесных параметров за малоразмерными щелевыми соплами при продольном зондировании потока свободно от этого недостатка, однако требует обеспечения условий невозмущенного течения за срезом сопла, что сложно выполнить из-за трудностей безударного сопряжения контура сопла с каналом постоянного сечения. Интерпретация измерений неравновесных параметров потока за сопловыми решетками, представляющими собой набор малоразмерных сопловых каналов, установленных перпендикулярно направлению оптического зондирования, усложняется наличием в потоке за соплами вязких следов и скачков уплотнения, ускоряющих релаксационные процессы.

Поэтому для исследования рассматриваемых неравновесных течений большой интерес представляет измерение коэффициента усиления внутри щелевых профилированных сопел, обеспечивающих на разгонном участке осевой струйки тока высокую скорость охлаждения газа, а далее — в «ромбе постоянных скоростей» — течение, близкое к изотермическому при отсутствии в потоке заметных газодинамических неоднородностей. Проводя одновременно несколько измерений коэффициента усиления потока вдоль оси сопла, можно оценить эффективность замораживания колебательных степеней свободы газовой смеси при известной скорости охлаждения ее на осевой струйке тока и скорость релаксационных процессов при течении газа с практически постоянной поступательной температурой. При этом расчеты показывают, что существенная неравновесность течения на оси плоского сопла может быть реализована при достаточно большом абсолютном размере критического сечения (до 5 мм). Исследования колебательно-неравновесного течения в подобном сопловом устройстве выполнено в настоящей работе.

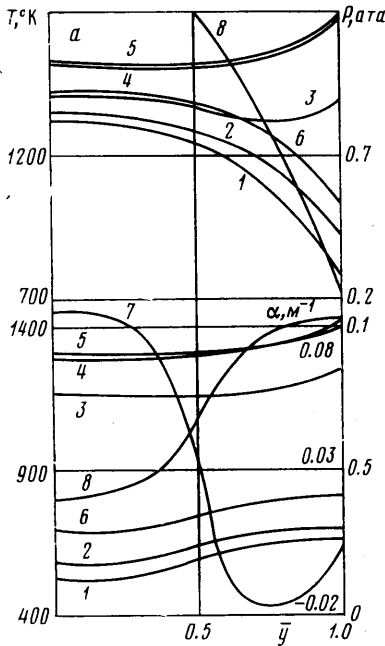
1. Измерения проводились с использованием техники ударной трубы большого диаметра в плоском профилированном сопле с геометрической степенью расширения $\epsilon=16$ и высотой критического сечения $h^*=4.34$ мм. Исследовался рабочий газ, представляющий собой смесь CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O в диапазоне начальных температур 1600–2100° К и давлений от 3 до 7 атм. Состав и концентрация паров воды в смеси контролировались методом отбора проб перед экспериментом по методике, аналогичной [4]. Давление P_+ на входе в сопло определялось экспериментально с использованием



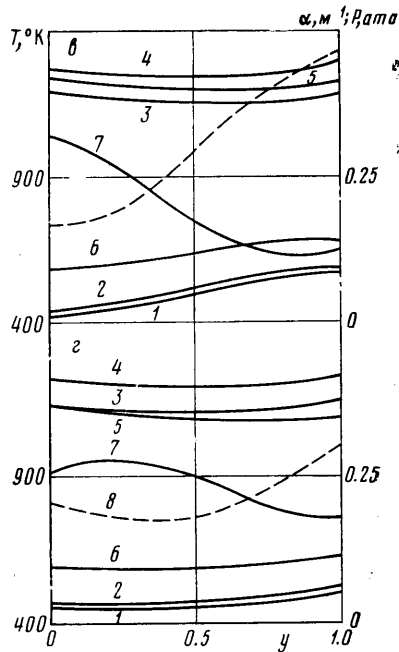
Фиг. 1

пьезодатчиков, а температура T_+ измерялась по методу обращения спектральных линий, описанному в [5].

Кроме измерений коэффициентов усиления (методика измерений приведена в [2]) и начальных параметров потока отдельно на специальном аэродинамическом стенде были проведены продувки указанного сопла с целью определения диапазона начальных давлений, обеспечивающих условия безотрывного течения в сопле. Визуализация структуры потока и контроль его качества проводились с помощью стандартного теневого прибора ИАБ-451. В процессе экспериментов изменялась величина давления газа на входе в сопло и разрежение в демпферной емкости, куда истекал



Фиг. 2



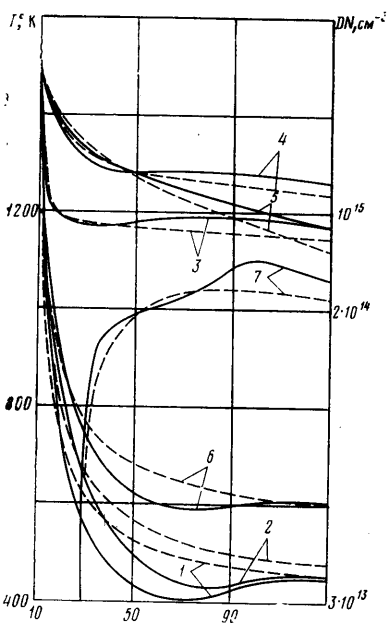
Фиг. 3

газ. Картина фотографировалась с помощью фотоприставки. На фиг. 1 представлены результаты обработки полученных теплереограмм в виде зависимости положения точки отрыва потока от располагаемого перепада давления P^* на входе в исследуемое сопло.

Видно, что полностью безотрывное течение внутри сопла реализуется при значении перепада $P^* \geq 100$, что обусловило в основных экспериментах на ударной трубе выбор соответствующего диапазона скоростей ударной волны и перепада давлений на входе в сопло ($v_s \geq 1.3$ км/сек).

2. Результаты измерений коэффициентов усиления сравнивались с расчетами, выполненными для одномерного и двумерного описания течения релаксирующего газа в сопле с использованием модели колебательного энергообмена, рассмотренной в [6]. Для вычисления неравновесных параметров двумерного потока использовался подход, предложенный в [7] для химически неравновесных течений, основанный на решении обратной задачи теории сопла при заданном распределении давления или плотности вдоль выделенных струек тока. Такой же метод расчета применительно к колебательно-неравновесным течениям рассматривался в [8, 9, 10, 11]. При этом в [9] действительные значения давления вдоль струек тока находились в итерационном процессе, приближающем задаваемую функцию тока к реальной. Расчет упрощается при задании в качестве нулевого приближения распределения плотности вдоль выделенных струек тока, полученного из двумерного расчета поля равновесного течения.

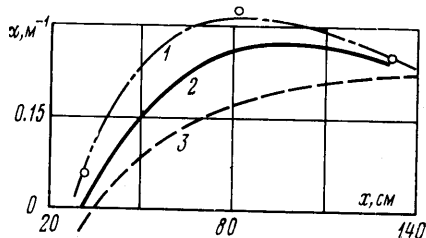
В данной работе поле равновесного течения рассчитывалось, как и в [8, 11], в предположении постоянства показателя адиабаты расширения, причем в до- и трансзвуковой областях расчет проводился методом установления, а в сверхзвуковой области — сеточно-характеристическим методом. Использование для численного ин-



Фиг. 4

тегрирования системы уравнений газовой динамики и колебательной кинетики невязной разностной схемы второго порядка аппроксимации [7, 10] позволяло вести устойчивый счет как в околоравновесных, так и в существенно неравновесных областях без ограничения шага интегрирования.

3. Рассмотрим изменение расчетных газодинамических и кинетических параметров течения газовой смеси в исследованном сопле с наиболее интересным для данной серии экспериментов составом смеси в мольных долях: $\gamma_{CO_2}=0.078$, $\gamma_{N_2}=0.710$, $\gamma_{O_2}=0.185$, $\gamma_{H_2O}=0.027$ с начальными параметрами $T_+=1750^\circ K$ и $P_+=4.75 \text{ атм}$.



Фиг. 5

На фиг. 2, а, б, 3, в, г представлены распределения неравновесных параметров (T_i , T , P) и величина коэффициента усиления α ветви P (20) перехода $00^0_1 \rightarrow 10^0_0$ по высоте сопла для четырех характерных сечений, здесь $y=2y/h^*$, y — поперечная координата сопла.

Расчет проводился для реального контура с точностью до толщины вытеснения, которая не учитывалась, поскольку в условиях экспериментов на ударных трубах толщина пограничного слоя, по-видимому, достаточно мала. Результаты приведены на фиг. 2, 3. Кривые на фиг. 2, 3 соответствуют: 1 — T , 2 — T_2 , 3 — T_3 , 4 — T_4 , 5 — T_5 , 6 — T_6 , 7 — α , 8 — P . Из фиг. 2, а видно, что в трансзвуковой области, непосредственно вблизи критического сечения ($x=10 \text{ мм}$) существует неравномерность не только давления и поступательной температуры, но и колебательных температур T_2 и T_6 , которые определяют заселенность уровней деформационного типа колебаний молекул CO_2 и H_2O соответственно.

Уменьшение значений T_2 и T_6 от оси ($\bar{y}=0$) к стенке ($\bar{y}=1$) сопла аналогично поведению поступательной температуры T и объясняется интенсивной столкновительной релаксацией $V-T$ состояний (01^0) CO_2 и (01^0) H_2O . Более слабая дезактивация асимметричных колебаний молекулы CO_2 и состояний ($\nu=1$) молекул N_2 и O_2 приводит к существенно отличному от T_2 , T_6 и T изменению колебательных температур, определяющих заселенность этих уровней T_3 , T_4 и T_5 соответственно. Указанные в [6] особенности энергообмена в смесях $CO_2-N_2-O_2-H_2O$ и значительная неравномерность параметров в трансзвуковой области существенно влияют на кинетику энергообмена и в сверхзвуковой части сопла.

Дальнейшее развитие неравновесного течения показано на фиг. 2, б и 3, в, г. Распределения параметров, представленные на этих фигурах, соответствуют сечениям, в которых проводилась диагностика потока — $x=33, 82, 136 \text{ мм}$ от входной части сопла. Ясно виден существенно неоднородный характер в распределениях T_i , T , P , α , особенно в области формирования инверсии ($x=33 \text{ мм}$). Лишь в выходном сечении ($x=136 \text{ мм}$) поток становится близким к одномерному. Рассмотренные особенности течения приводят к заметному отличию от одномерных параметров потока даже на оси сопла. Это иллюстрирует фиг. 4, на которой показано изменение газовой T и колебательных T_i температур (обозначения кривых прежние), а также величины инверсии вдоль осей струйки тока ΔN (кривая 7).

Сплошными линиями здесь изображены результаты, полученные из двумерного расчета для осевой струйки тока, а штрихпунктирными — вычисления по одномерной методике. Из представленных результатов расчета видно, что при двумерном описании выявляется некоторый переразгон потока на осевой линии тока, обуслов-

ленный неточностью профилирования рассматриваемого сопла. Указанная особенность приводит к увеличению T_2 и уменьшению T_1 и, следовательно, к увеличению величины инверсии и коэффициента усиления в реальных условиях по сравнению с одномерной схемой течения.

На фиг. 5 представлены результаты измерений коэффициента усиления излучения зондирующего CO_2 -лазера на линии $P(20)$ молекулярной полосы ($00^{\circ}4$) — ($10^{\circ}0$) CO_2 в рассматриваемом сопле для указанных выше начальных параметров рабочего газа. Здесь показаны результаты расчета показателя усиления, полученные в двумерном (кривые 1 и 2) и одномерном (кривая 3) приближениях. Кривые 2 и 3 рассчитаны с использованием температурной зависимости для константы дезактивации нижнего уровня CO_2 с водой согласно общепринятым данным [12], а кривая 1 — согласно более поздним рекомендациям работы [13]. Отличительной особенностью двумерных расчетов является наличие максимума коэффициента усиления в области $x=70 \div 110$ мм, существование которого подтверждается результатами измерений. Отметим, что лучшее согласие расчетов и эксперимента при температурах торможения 1800°K достигается с использованием константы скорости релаксации согласно [13], а при температурах более низких ($\sim 1600^{\circ}\text{K}$) как по данным [12], так и по данным [13].

Из рассмотренного примера следует, что реальная структура потока в профилированном сопле оказывает существенное влияние на процесс формирования инверсии. При этом необходимо подчеркнуть, что даже при совпадении результатов расчета с результатами измерений коэффициент усиления на выходе из сопла теоретическое описание процесса изменения неравновесных параметров потока в одномерном приближении не является достаточно строгим для течения внутри сопла и не может однозначно распространяться на все практически интересные случаи. Указанное обстоятельство особенно важно учитывать, когда измерения проводятся в одном, а не в нескольких сечениях по потоку. В этом случае совпадение результатов расчета с экспериментом может носить случайный характер и приведет к неправильным выводам относительно использованных констант, метода расчета и кинетической модели.

Авторы благодарны В. А. Полторацкому за помощь в проведении экспериментов, Г. Д. Смехову и С. А. Лосеву за полезные обсуждения.

Поступила 10 VIII 1978.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лосев С. А. Газодинамические лазеры. М., «Наука», 1977.
2. Бриган А. Б., Лосев С. А., Шагалов О. П. Влияние добавок на коэффициент усиления смеси в газодинамическом лазере на углекислом газе. Квантовая электроника, 1974, т. 1, № 12.
3. Левин В. А., Туник Ю. В. Движение релаксирующей смеси газов в двумерных плоских соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1976, № 1.
4. Белков П. В., Вакагов В. П., Ткаченко Б. К., Широков Н. Н. Экспериментальное исследование зависимости показателя усиления в газодинамическом лазере на смеси $\text{CO}_2\text{-N}_2$ от содержания паров воды. Физика горения и взрыва, 1976, т. 12, № 4.
5. Смехов Г. Д., Полторацкий В. А., Бриган А. Б. Модифицированный метод обращения спектральных линий для измерения температуры газа, нагретого в ударной волне. Теплофизика высоких температур, 1978, т. 16, № 6.
6. Егоров В. В., Комаров В. Н. Расчет инверсии заселенностей и коэффициента усиления релаксирующей смеси газов при течении в соплах. Тр. ЦАГИ, 1975, вып. 1656.
7. Камзолов В. Н., Пирумов У. Г. Расчет неравновесных течений в соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1966, № 6.
8. Анашкин А. И., Хайлов В. М., Шизман Ю. М. К расчету колебательной неравновесности в плоских сверхзвуковых соплах. Теплофизика высоких температур, 1976, т. 14, № 5.
9. Бреев В. В., Минин С. Н., Пирумов У. Г., Шевченко В. Р. Течение смеси газов с релаксацией колебательной энергии в плоских и осесимметричных соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1977, № 5.
10. Крайко А. Н. О расчете неравновесного течения газа в соплах Лаваля. Науч. тр. Ин-та механ. МГУ, 1973, № 21.
11. Бирюков А. С., Сериков Р. И., Старик А. И., Шелепин Л. А. Влияние неоднородностей параметров потока на характеристики рабочих сред CO_2 - и N_2O -газодинамических лазеров. Квантовая электроника, 1977, т. 4, № 4.
12. Rosser W. S., Hoag E., Gerry E. T. Relaxation of excess populations in the lower laser level $\text{CO}_2(100)$. J. Chem. Phys., 1972, vol. 57, No. 10.
13. Sharma R. D. Vibrational relaxation of CO_2 by H_2O . J. Chem. Phys., 1971, vol. 54, No. 2.