

9. Н. А. Генералов, В. Я. Овечкин. Теор. и эксп. химия, 1968, 4, 6, 829.
10. М. С. Яловик, С. А. Лосев. Тр. Института механики МГУ, № 18. М., Изд-во МГУ, 1972.
11. С. А. Лосев. ФГВ, 1973, 9, 6, 767.
12. В. Я. Овечкин, Н. А. Генералов. Вестник МГУ. Физика, Астрономия, 1969, 6, 3.

КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ЛАЗЕРЕ НА СМЕСИ $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2$

Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков, И. Б. Светличный

(Москва)

Возможность использования в CO_2 -ГДЛ молекулярного водорода показана в [1, 2]. Результаты измерения коэффициента усиления на длине волны $\lambda = 10,6$ мкм и интенсивности спонтанного ИК-излучения в полосе 4,3 мкм молекулы CO_2 при сверхзвуковом расширении смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2$ и при $p_0 = 5 \div 25$ атм и $T_0 = 800 \div 3000$ К перед соплом приведены в [3]. В [4] на основе измерений интенсивности излучения в полосе 4,3 мкм определена колебательная температура асимметричной моды углекислого газа T_3 в предположении о равновесии объединенной (симметричной и деформационной) моды CO_2 с поступательными степенями свободы ($T_2 = T$).

Как показано в [5], одновременное измерение интенсивности спонтанного излучения CO_2 в полосе 4,3 мкм I и коэффициента усиления излучения зондирующего CO_2 -лазера K_0 позволяет экспериментально определить населенности и, следовательно, колебательные температуры обоих рабочих уровней лазерного перехода (001—100) молекулы CO_2 . В данной работе представлены результаты определения колебательных температур асимметричной (T_3) и объединенной (T_2) мод углекислого газа по значениям величин K_0 и I , измеряемым в [3] для условий ГДЛ, работающих на смеси $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2$.

В смеси двуокиси углерода с молекулярным водородом при высоких температурах протекает реакция



Образующиеся в реакции (1) молекулы CO и особенно H_2O могут существенно влиять на колебательный энергообмен в исследуемых смесях. Необходимо учитывать также уменьшение концентрации CO_2 в результате реакции.

Расчет химического состава смеси в предсопловом объеме проводился на основании экспериментальных данных [6] по кинетике брутто-реакции (1). Согласно [6], содержание паров воды в смеси определяется зависимостью

$$\xi_{\text{H}_2\text{O}} = \xi_{\text{H}_2\text{O}}^0 \{1 - \exp[-k_1 (\xi_{\text{H}_2}^0)^{0,3} [M] t^2]\}, \quad (2)$$

где $k_1 = 10^{20 \pm 0,2} \exp\left(-\frac{81,4 \pm 2,3}{RT}\right)$ (см³/моль·с); $\xi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{\text{H}_2\text{O}}{[M]}$ — относительная концентрация молекул воды; $\xi_{\text{H}_2\text{O}}^0$ — соответствующее равновесное значение; $\xi_{\text{H}_2}^0$ — начальная относительная концентрация водорода; $[M]$ — общая плотность частиц; t — время.

Усилительные и радиационные характеристики исследованных в [3] смесей измерялись на временном интервале 0,15 ÷ 0,25 мс после отражения от торца трубы падающей ударной волны. Поэтому, в таблице при-

Номер смеси	Состав смеси	p_0 , атм	$\xi_{H_2O} \cdot 10^2$ при T_0 , К								
			1750	1875	2000	2125	2250	2375	2500	2750	3000
3	$0,1CO_2 + 0,89N_2 + 0,01H_2$	$6,0 \pm 1,5$	0,002	0,009	0,03	0,1	0,25	0,53	0,81	0,98	0,99
4	$0,1CO_2 + 0,85N_2 + 0,05H_2$	$6,0 \pm 1,5$	0,01	0,07	0,2	0,72	1,8	3,2	4,2	4,4	4,5
5	$0,1CO_2 + 0,8N_2 + 0,1H_2$	$6,0 \pm 1,5$	0,03	0,13	0,47	1,4	3,1	5,6	7,0	7,2	7,3
6	То же	$7,5 \div 13$	0,05	0,26	0,9	2,5	4,7	6,8	7,1	7,2	7,3
7	»	$13 \div 25$	0,1	0,51	1,7	4,1	6,0	6,8	7,1	7,2	7,3
8	$0,1CO_2 + 0,7N_2 + 0,2H_2$	$6,0 \pm 1,5$	0,05	0,2	0,7	2,1	4,7	7,6	8,8	8,9	9,0

Примечание. Процентное содержание паров воды в исследованных смесях определено при $t = 0,15 \div 0,25$ мс.

ведены результаты расчета концентрации паров воды для этого периода времени в исследованных смесях в зависимости от температуры и давления в предсопловом объеме. Нумерация смесей в таблице соответствует обозначениям экспериментальных кривых на рис. 1—4 и в [3]. Результаты, полученные для смеси $0,1CO_2 + 0,4N_2 + 0,5 He$ (величина p_0 соответствует ударной адиабате с начальным значением давления 0,2 атм), и для смеси $0,1CO_2 + 0,9N_2$ ($p_0 = 6,0 \pm 1,5$ атм) обозначены на рис. 1—4 и в [3] соответственно цифрами 1 и 2. Согласно [7], влияние молекул воды на кинетику образования инверсии населенностей в смеси $CO_2 + N_2$ необходимо учитывать при содержании H_2O в смеси, превышающем 0,005. Из таблицы видно, при каких T_0 содержание H_2O превышает это значение.

Определенный, согласно данным таблицы, состав смеси использовался при расчете колебательных температур T_3 и T_2 по измеренным величинам K_0 и I . Наличие в смеси окиси углерода, образующейся в реакции (1) при использовании широкополосного дисперсионного фильтра в канале регистрации ИК-излучения, приводит к необходимости учета излучения молекул CO в полосе 4,7 мкм [4].

Результаты измерения колебательной температуры асимметричной моды CO_2 в зависимости от температуры перед соплом для смесей 1—5 и 8 показаны на рис. 1. Температурная зависимость величины T_3 для смеси $0,1CO_2 + 0,8N_2 + 0,1H_2$ при различных давлениях приведена на рис. 2. Пунктирными линиями на рис. 1, 2 показана температура в критическом сечении сопла T_* для смесей 2—8, штрихпунктирной — для смеси 1.

Сравнение значений колебательной температуры, полученных в данной работе, с величинами T_3 , полученными для тех же смесей в [4], показывает, что определение T_3 по приближенному методу [4] приводит к завышенным на 40—120 К значениям в диапазоне температур перед соплом 800—2500 К. В [4] показано, что приближенный метод вследствие предположения о термализации объединенной моды позволяет получить оценку T_3 сверху. Из сравнения рис. 1, 2 с результатами [4] следует, что приближенный метод правильно отражает основные закономерности изменения величины T_3 в зависимости от T_0 , p_0 и состава смесей. К этим закономерностям относятся: увеличение T_3 и разности $(T_* - T_3)$ при возрастании T_0 , уменьшение T_3 при увеличении начальной концентрации водорода и повышении давления от 5 до 25 атм. Наибольшие значения T_3 достигаются при расширении бинарной смеси 2 ($0,1CO_2 + 0,9N_2$); наименьшие — в смеси 1 с гелием. Следует отметить, что значение T_* для смеси 1 существенно ниже значения T_* для смесей 2—8.

Зависимости колебательной температуры объединенной моды CO_2 от температуры перед соплом для смесей 1—5 и 8 при $p_0 = 6,0 \pm 1,5$ атм

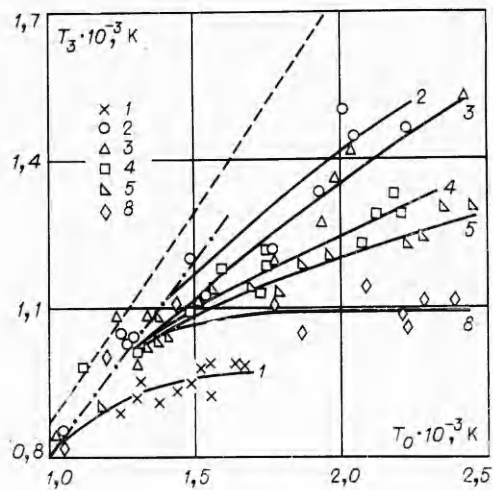


Рис. 1.

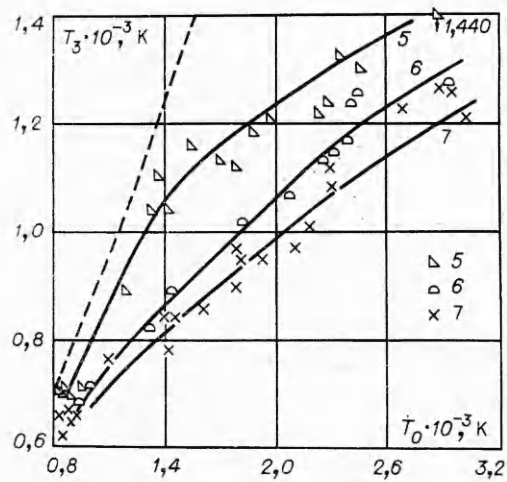


Рис. 2.

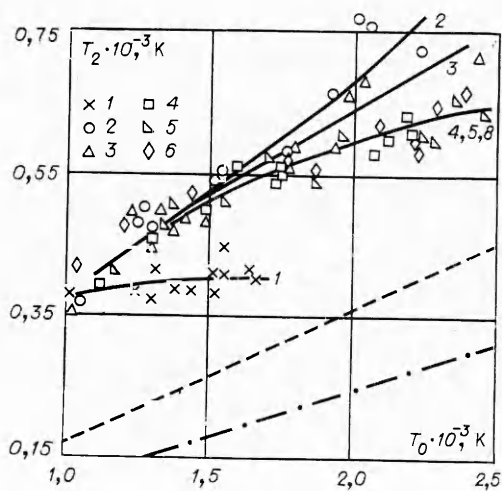


Рис. 3.

и для смеси $0,1\text{CO}_2 + 0,8\text{N}_2 + 0,1\text{H}_2$ при изменении давления от 5 до 25 атм представлены на рис. 3, 4. Штриховыми линиями на рис. 3, 4 показана температура газа в рабочем сечении потока для смесей 2—8, штрихпунктирной — для смеси 1. Для всех исследованных смесей в условиях данной работы ($T_0 = 800 \div 3000$ К, $p_0 = 5 \div 25$ атм) наблюдается возрастающая зависимость T_2 от T_0 . Отметим высокую степень неравновесности объединенной моды CO_2 : колебательная температура превышает газовую температуру в 1,5—2,0 раза. Для смесей 4, 5, 8 с начальным содержанием водорода 0,05; 0,1; 0,2 ($p_0 = 6,0 \pm 1,5$ атм) величины T_2 во всем диапазоне $T_0 = 800 \div 2500$ К совпадают в пределах точности измерений. Для смеси 3 ($\xi_{\text{H}_2}^0 = 0,01$) наблюдаются повышенные значения T_2 при $T_0 \geq 1600$ К. В этой же области температур T_0 бинарная смесь 2 обладает наибольшей колебательной температурой T_2 . Величина T_2 для смеси 1, содержащей гелий, существенно ниже, чем для смесей 2—5, 8 с добавками водорода.

Влияние давления на колебательную температуру объединенной моды CO_2 для смеси с $\xi_{\text{H}_2}^0 = 0,1$ иллюстрируется кривыми 5—7 рис. 4. Измеренные значения T_2 для $p_0 = 7 \div 25$ атм практически совпадают (см. рис. 4, 6, 7) во всем исследованном диапазоне $T_0 = 800 \div 3000$ К. При $p_0 = 6,0 \pm 1,5$ атм (см. рис. 4, 5) величина T_2 на $60 \div 100$ К выше, чем для давлений $7,5 \div 25$ атм.

Таким образом, установленное в [3] увеличение коэффициента усиления и относительной инверсной населенности лазерных уровней CO_2 при добавлении в бинарную смесь $\text{CO}_2 + \text{N}_2$ молекулярного водорода в количестве $1 \div 5\%$ обусловлено более значительным уменьшением населенности нижнего лазерного уровня по сравнению с верхним (см. кривые 2—4 на рис. 1, 3). Снижение коэффициента усиления (см. кривые 5, 8 на рис. 3, 4 [3]) при высоких концентрациях водорода ($0,1 \div 0,2$) определяется преимущественным уменьшением населенности верхнего лазерного уровня T_3 (см. кривые 5, 8 на рис. 1, 3). При увеличении давления газа в предопловом объеме отмеченное в смеси $0,1\text{CO}_2 + 0,8\text{N}_2 + 0,1\text{H}_2$ снижение коэффициента усиления связано с более быстрой релаксацией асимметричной моды CO_2 по сравнению с объединенной (см. кривые 5—7 на рис. 2—4).

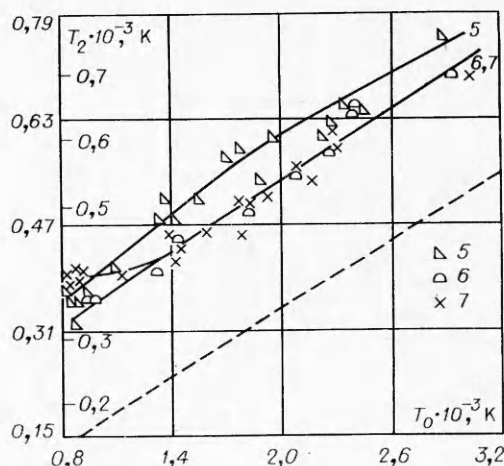


Рис. 4.

Поступила в редакцию
1/XII 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Б. Британ, С. А. Лосев, О. П. Шаталов. Квантовая электроника, 1974, 1, 12, 2620.
2. I. Rom, J. Stricker. Acta Astronautica, 1974, 1, 1101.
3. Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков, И. Б. Светличный. ФГВ, 1976, 12, 5.
4. Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков, И. Б. Светличный. ФГВ, 1977, 13, 2.
5. Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков, И. Б. Светличный. Докл. АН СССР, 1976, 231, 6.
6. J. M. Brupbacher, R. D. Kern, B. V. O'Gady. J. Phys. Chem., 1976, 80, 1031.
7. I. D. Anderson. Gasdynamic Lasers: An Introduction. N. Y., Acad Press, 1976.