

ЛИТЕРАТУРА

1. Поручиков В. Б. Решение задачи о дифракции акустической волны на конусе. ПММ, 1968, т. 32, вып. 2.
2. Филиппов А. Ф. Дифракция произвольной акустической волны на клине. ПММ, 1964, т. 28, вып. 2.

УДК 539.196

ДЕЗАКТИВАЦИЯ КОЛЕБАНИЙ МОЛЕКУЛ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ОХЛАЖДАЮЩЕМСЯ ПОТОКЕ

А. Б. БРИТАН, С. А. ЛОСЕВ, В. Н. МАКАРОВ, В. А. ПАВЛОВ,
О. П. ШАТАЛОВ

(Москва)

В настоящее время можно считать установленным, что по крайней мере для двухатомных молекул время колебательной дезактивации τ_g при охлаждении газа практически совпадает с временем колебательного возбуждения τ_b при нагреве газа [1, 2]. Решение этого вопроса для трехатомных молекул, в частности для молекул углекислого газа, представляет значительный интерес.

В данной работе исследована дезактивация колебаний молекулы CO_2 при охлаждении в плоском 30-градусном сопле, установленном в торце ударной трубы; газ предварительно нагревался в ударной волне. Работа велась на ударной трубе с внутренним диаметром 500 мм, исследовалось поглощение в сопле излучения 10.6 мкм, генерируемого электроразрядным лазером на CO_2 . Высота критического сечения сопла 0.35 или 1.8 мм, и измерение поглощения проводилось на расстоянии 56 мм от критического сечения. Начальное давление газа перед входом в сопло от 3 до 10.5 атм и температура от 870 до 2470° К. Описание экспериментальной установки и методики измерений дано в [3].

В результате эксперимента получали осциллограммы распределения поглощения излучения в полосах перехода (100) → (001) углекислого газа и отсюда величину коэффициента поглощения k в квазистационарном периоде течения газа через сопло (см. [3]). Для конкретных начальных условий каждого эксперимента проводился расчет течения релаксирующего углекислого газа в сопле при заданных значениях времени релаксаций τ_b [4, 5] и вероятностей энергообмена Q° [6], а затем вычислялся коэффициент поглощения k [7], который и сопоставлялся с экспериментальным значением для этой величины. Варьируя значения времени релаксации, добивались наилучшего согласования измеренного и рассчитанного значений коэффициента поглощения. Аналогичная процедура была использована ранее при исследовании дезактивации колебаний охлаждающегося молекулярного кислорода [1].

Расчет течения релаксирующего газа в сопле проводился исходя из начальных значений параметров газа за отраженной ударной волной (перед входом в сопло), полученных на основании измерения скорости распространения ударной волны и начального давления газа в трубе. Задача решалась численно в квазидономерной постановке. Подробности расчета даны в [3, 8]. Учет пограничного слоя, возникающего на стенках сопла, проводился в рамках модели вытеснения по методике, аналогичной описанной в работе [9].

Отметим, что в работе не проводился модовый анализ структуры генерации зондирующего лазера и расчет поглощения проводился для центра наиболее сильной линии перехода ($p=20$). Как показал проведенный в работе [10] анализ, возможная ошибка в расчете коэффициента поглощения при этом не превышала 20–30%, что лежит в пределах разброса полученных экспериментальных результатов. При расчете значений коэффициента поглощения значения вероятности обмена Q_{23} и времени дезактивации колебаний τ_g записывались в виде $Q_{23}=\alpha Q^\circ$ и $\tau_g=\beta\tau_b$, а параметры α и β варьировались в широком диапазоне значений с целью получения совпадения рассчитанных и измеренных значений коэффициента поглощения.

Результаты расчета показали, что в исследованном диапазоне температур и давлений значения коэффициента поглощения CO_2 очень слабо чувствительны к изменению вероятности Q_{23} колебательного энергообмена между вторым и третьим типами колебаний молекулы CO_2 . Действительно, изменение величины Q_{23} в 50 раз (при сохранении неизменными остальных параметров и начальных условий) влияет на из-

менение величины k менее чем в 1.5 раза. Слабая чувствительность измеряемой величины k к значениям Q_{23} приводит к тому, что неточности в определении величины Q_{23} , так же как и замена значений Q° , взятых из [6], на значения Q° из работы [11], практически не сказываются на результатах расчета течения углекислого газа в сопле и на расчете значений коэффициента поглощения.

Вместе с тем рассчитываемые значения k очень чувствительны к изменению параметра $\beta = \tau_g/\tau_b$. Такой характер зависимости коэффициента поглощения k от τ и Q естественно связан с тем, что метод измерения по существу реагирует на величину заселенности колебательных уровней именно первого и второго типов колебаний молекул CO_2 (исходные уровни в процессе поглощения излучения). Понятно, что величина заселенности этих уровней в первую очередь определяется поступательно-колебательным энергообменом, т. е. временем τ . Это в определенной мере устраняет неоднозначность результатов, отмеченную в [12], где исследовалась заселенность уровней третьего типа колебаний молекулы CO_2 , существенно зависящая от величины Q . Таким образом, измеренные значения коэффициента поглощения k позволяют определить параметр β , связывающий значения времени возбуждения и дезактивации колебаний молекул углекислого газа. В результате обработки 20 осциллограмм с доверительной вероятностью 0.95 можно утверждать, что $\beta = \tau_g/\tau_b = 1.1 \pm 0.4$. Таким образом, в пределах разброса экспериментальных результатов, времена возбуждения и дезактивации колебаний молекулы углекислого газа совпадают одно с другим. Этот результат совпадает с полученным ранее соотношением между временами возбуждения и дезактивации колебаний в кислороде [1] и подтверждает теоретические соображения, на основании которых эти времена равны между собой с точностью до эффектов, связанных с ангармоничностью молекул [2]. Полученные значения τ_g могут быть отнесены к температуре «замораживания» колебаний в сопле, которая в данных экспериментах менялась от 600 до 1400° К. При обработке экспериментов в указанном диапазоне температур не было обнаружено какой-либо зависимости параметра β от T .

Учет пограничного слоя слабо сказывается на результатах расчета коэффициента поглощения. В экспериментах с высоким критическим сечением сопла (1.8 мм) учет пограничного слоя меняет рассчитываемую величину k не более чем на 7%. В экспериментах с критическим сечением 0.35 мм учет пограничного слоя изменяет значения k на 20–35%. Во всех экспериментах давление газа в исследованном сечении сопла (на расстоянии 56 мм от критического сечения) не превышало 0.05 атм, а в ряде случаев было менее 0.01 атм. В этих условиях оказалось невозможным проверить зависимость столкновительной полуширины линии Δ_c от температуры: результаты расчета, проведенного для $\Delta_c \sim 1/\sqrt{T}$ и $\Delta_c \sim 1/T$, отличались один от другого менее чем на 20%.

Следует отметить, что при измерении поглощения излучения в полосах перехода (100) → (001) молекулы CO_2 величина τ_g определяется независимо от других процессов колебательного энергообмена. Это позволяет исключить неоднозначность в трактовке полученных результатов в отличие от работы [12], где использовалась методика регистрации излучения. Кроме того, анализ условий эксперимента работы [12] показал, что вторичная ударная волна, которая обычно образуется в процессе запуска сопла [13], могла находиться во время измерений выше по потоку относительно сечения, в котором проводились измерения, что могло привести к систематическому искажению полученных результатов.

Таким образом, выполненное исследование позволяет утверждать, что роль ангармоничности и других факторов, приводящих к различию между кинетическими характеристиками процесса колебательной релаксации при нагреве и охлаждении углекислого газа при температурах 600–1400° К, незначительна. Это дает все необходимые основания при проведении расчетов кинетики охлаждения углекислого газа, как это было установлено ранее и для двухатомных молекул, использовать данные, полученные в опытах, которые проведены в иных условиях (прежде всего при нагреве в ударных волнах). Вместе с тем полученный результат подтверждает выводы, сделанные в работе [14], где указано, что приведенные в обзоре [15] значения скоростей дезактивации колебаний молекул ошибочны.

Поступила 29 VII 1975.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров В. Н., Шаталов О. П. Колебательная дезактивация молекулярного кислорода в охлаждающемся потоке. Изв. АН СССР, МЖГ, 1974, № 2.
2. Лосев С. А. Кинетика релаксационных процессов в ударных волнах и охлаждающихся потоках газов. Физика горения и взрыва, 1973, № 6.
3. Лосев С. А., Макаров В. Н., Павлов В. А., Шаталов О. П. Исследование процессов в газодинамическом лазере на ударной трубе большого диаметра. Физика горения и взрыва, 1973, № 4.

4. Taylor R. L., Bitterman S. Vibrational energy transfer in the $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ molecular system. Proc. 7-th Internat. Shock Tube Sympos. Toronto, 1969. Toronto, 1970.
5. Taylor R. L., Bitterman S. Survey of vibrational relaxation Data for processes important in the $\text{CO}_2\text{-N}_2$ laser system. Rev. Modern. Phys., 1969, vol. 41, No. 1.
6. Rosser W. A., Wood A. D., Gerry E. T. Deactivation of vibrationally excited carbon dioxide (v_3) by collisions with carbon dioxide or with nitrogen. J. Chem. Phys., 1969, vol. 50, No. 11.
7. Пеннер С. С. Количественная молекулярная спектроскопия и излучательная способность газов. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
8. Лосев С. А., Макаров В. Н. Оптимизация коэффициента усиления в газодинамическом лазере на углекислом газе. Квантовая электроника, 1974, т. 1, № 7.
9. Бурке А. Ф., Бирд К. Д. Применение конических и профилированных сопел в гиперзвуковых установках. В сб. Современная техника аэродинамических исследований при гиперзвуковых скоростях. М., «Машиностроение», 1965.
10. Солоузин Р. И., Якоби Ю. А. К вопросу об измерении коэффициента усиления. ПМТФ, 1974, № 3.
11. Бирюков А. С., Конюхов В. К., Луковников А. И., Сериков Р. И. Релаксация колебательной энергии уровня ($00^0 1$) молекулы CO_2 . ЖЭТФ, 1974, т. 66, № 4.
12. Евтюгин Н. В., Лосев С. А., Макаров В. Н., Павлов В. А., Ялович М. С. Исследование колебательной дезактивации молекул углекислого газа при охлаждении потока в сверхзвуковом сопле. ПМТФ, 1973, № 6.
13. Smith C. E. Starting process in hypersonic nozzle. J. Fluid Mech., 1966, vol. 24, No. 4.
14. MacDonald J. R. Interpretation of sodium line-reversal measurements in rapid expansions of nitrogen. J. Chem. Phys., 1972, vol. 57, No. 2.
15. Hurle I. R. Nonequilibrium flows with special reference to the nozzle-flow problem. Shock Tube Res. Proc. 8-th Internat. Sympos., London, 1971.