

ЛИТЕРАТУРА

1. Варгин А. Н., Ганина Н. А., Конохов В. К., Селяков В. И. Расчет вероятностей вращательных переходов двухатомных молекул при столкновении с тяжелыми частицами.— ПМТФ, 1975, № 2.
2. Варгин А. Н., Ганина Н. А., Камалова Э. К., Конохов В. К., Луковников А. И., Селяков В. И. Расчет вероятностей вращательных переходов двухатомных молекул с потенциалом Морзе.— ПМТФ, 1978, № 3.
3. Варгин А. Н., Ганина Н. А., Конохов В. К., Луковников А. И., Селяков В. И. Получение инверсии на вращательных уровнях двухатомных молекул при адиабатическом расширении газа.— Квант. электроника, 1975, т. 2, № 3.
4. Takayanagi K. Supplement of theoretical physics, 1953, N 25.
5. Давыдов А. С. Квант. механика. М., Наука, 1973.
6. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квант. механика. М., 1963.
7. Таунс Ч., Шавлов А. Радиоспектроскопия. М., ИЛ, 1959.
8. Арсенин В. Я. Уравнения математической физики. М., Наука, 1968.

УДК 621.378.33

К ВОПРОСУ О РЕЗОНАНСНОМ ПОГЛОЩЕНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ (10,6 МКМ) В СМЕСЯХ $\text{CO}_2\text{—N}_2$ ЗА ФРОНТОМ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

А. Б. Британ, А. М. Старик

(Москва)

Важным параметром, определяющим форму линии поглощения (усиления), является величина столкновительной ширины спектральной линии. Применительно к течениям смесей $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—H}_2\text{O}$ (He) точность ее задания во всем интервале изменения поступательной температуры потока при охлаждении газа в сопле существенно влияет на правильность вычисления показателя усиления среды. Вопрос о температурной зависимости ширины спектральной линии молекулы CO_2 занимает особое место при создании математических моделей колебательного энергообмена, если критерием их справедливости при сравнении теории и эксперимента является показатель усиления.

К настоящему времени значение столкновительной ширины спектральной линии b_c для молекулы CO_2 известно с достаточной точностью при $T = 300$ К в смесях $\text{CO}_2\text{—N}_2\text{—He}$ [1]. В то же время, несмотря на довольно большое число работ по исследованию температурной зависимости $b_c(T)$ [2—5], этот вопрос до сих пор остается открытым. Для улучшения согласия теоретических и экспериментальных зависимостей показателя поглощения в CO_2 от температуры привлекались различные законы изменения $b_c = f(T)$. Так, в [2] наилучшее согласие теории и эксперимента при $T = 360\text{—}400$ К было получено в предположении $b_c \sim T^{-3/2}$, а в [4] вплоть до $T = 1600$ К при объяснении экспериментальных результатов использовалась зависимость $b_c \sim 1/T$ и учитывался вклад «горячих» переходов $R23(01^1_1 \rightarrow 11^1_0)$ и $R4(02^0_1 \rightarrow 12^0_0)$. В то же время в [3, 5] изменение показателя поглощения k_v с температурой удалось объяснить в предположении $b_c \sim T^{-1/2}$ с учетом вклада дополнительных переходов и эффекта перекрытия вращательных полос при $p > 1$ ата и $T > 1000$ К. Следует также отметить, что в основном эти работы были посвящены рассмотрению зависимости $k_v(T)$ в чистом CO_2 , данные же для смесей $\text{CO}_2\text{—N}_2$ практически отсутствуют.

В настоящей работе с целью определения температурной зависимости столкновительной ширины ударной линии в смесях $\text{CO}_2\text{—N}_2$ рассмотрено поведение показателя поглощения на переходе $P20$ ($00^0_1 \rightarrow 10^0_0$) молекулы CO_2 за фронтом прямых ударных волн при изменении температуры от 700 до 1250 К и содержания N_2 в смеси от 0 до 95 %.

В общем случае величина показателя поглощения среды за фронтом прямых ударных волн не определяется однозначно значениями поступающей температуры и давления, а зависит также и от неравновесных параметров, характеризующих распределение энергии по внутренним степеням свободы молекул смеси [6]. Поэтому при определении зависимости $k_\nu = f(T)$ необходимо проводить измерения в конце релаксационной зоны, когда установилось полное термодинамическое равновесие. С этой целью в данной работе в каждом конкретном случае рассматривался процесс установления равновесия в релаксационной зоне за фронтом ударной волны с учетом $V\text{—}T$ - и $V\text{—}V$ -процессов колебательного энергообмена в смесях $\text{CO}_2\text{—N}_2$. Расчет неравновесных параметров в потоке проводился по методике, рассмотренной в [6]. Показатель усиления среды определялся в соответствии с вычисленными значениями неравновесных параметров в каждой точке релаксационной зоны в предположении совместного действия доплеровского и столкновительного механизмов уширения [1, 7].

При анализе зависимости показателя поглощения от температуры рассматривалось два закона изменения $b_c(T)$: $b_c \sim 1/T$ и $b_c \sim T^{-1/2}$. Первый соответствует предположению о зависимости сечений ударного уширения $\sigma_i^{\text{CO}_2}$ от температуры как $T^{1/2}$, а второй $\sigma_i^{\text{CO}_2} = \text{const}$.

Коэффициент Эйнштейна для перехода $P20(00^0_1 \rightarrow 10^0_0)$ известен в настоящее время с достаточной точностью и, согласно [1], принимался равным $0,187 \text{ с}^{-1}$, а значения $b_{\text{CO}_2\text{—CO}_2} = 0,191 \text{ см}^{-1} \text{ атм}^{-1}$; $b_{\text{CO}_2\text{—N}_2} = 0,73 b_{\text{CO}_2\text{—CO}_2}$ в соответствии с [1, 7].

Эксперименты проводились на ударной трубе большого диаметра. Использовалась схема измерения поглощения, приведенная в [8], модифицированная таким образом, что одновременно зондировался поток в двух сечениях за фронтом ударной волны. Расстояние между измерительными сечениями 19 мм. Погрешность экспериментального определения показателя поглощения оценивалась для выборки из десяти экспериментов, проведенных в близких условиях по методике [9], и не превышала 10%. Одновременный контроль поглощения по двум независимым каналам позволил перевести систематические ошибки в разряд случайных.

Ширина спектральной линии задающего CO_2 -лазера была существенно меньше соответствующей величины для линии поглощения. Поэтому все расчеты проводились для центра линии.

Процесс установления термодинамического равновесия за фронтом ударной волны контролировался по выходу показателя поглощения на стационарный уровень. Параметры за фронтом «вязкого скачка уплотнения» рассчитывались по известным значениям скорости ударной волны, давлению и температуре неподвижного газа. Температура поддерживалась постоянной $T_1 = 293 \text{ К}$, а давление изменялось от 0,018 до 0,021 атм. Ошибка в определении скорости ударной волны не превышала 2%, а ее величина варьировалась в пределах 0,89—1,48 мм/мкс. Поскольку толщина пограничного слоя δ мала по сравнению с диаметром трубы ($\delta/D = 0,004$), эффекты, связанные с его влиянием на величину скорости ударной волны и кривизну фронта, во внимание не принимались.

При анализе экспериментальных результатов по измерению показателя поглощения учитывался вклад «горячих» переходов в величину k_ν ,

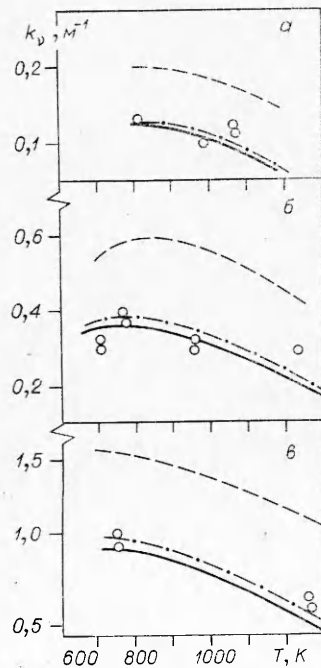
и его значение вычислялось по соотношению

$$k_v = k_v [P_{20}(10^0 - 00^0)] + k_v [R_{23}(01^1 \rightarrow 11^1)] + k_v [R_4(02^0 \rightarrow 12^0)].$$

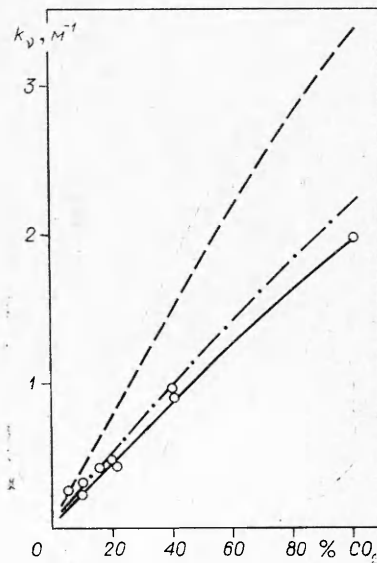
При этом для дополнительных переходов R -ветви значения коэффициентов Эйнштейна и сечений ударного уширения выбирались в соответствии с данными работы [5]. Следует отметить, что в рассматриваемом диапазоне температур ($T = 700-1250$ К) вклад этих переходов в величину показателя поглощения не превышал $0,1k_v [P_{20}(10^0 \rightarrow 00^0)]$, о чем также упоминалось в [5].

Давление за фронтом ударной волны во всем диапазоне измерений не превышало $0,55$ атм. Поэтому, согласно [5], эффекты перекрытия вращательных полос не учитывались. Поскольку в эксперименте имела место некоторая неопределенность в частоте задающего лазера, расчеты проводились для двух колебательно-вращательных линий перехода ($10^0 \rightarrow 00^0$) — P_{20} и P_{22} (фиг. 1, сплошные и штрихпунктирные линии соответственно). Результаты сравнения вычисленных в предположении $b_c \sim T^{-1/2}$ (сплошные линии) и $b_c \sim T^{-1}$ (штриховые) и измеренных значений показателя поглощения — k_v для трех различных смесей CO_2-N_2 с содержанием $\gamma_{\text{CO}_2} = 0,05; 0,15$ и $0,4$ при изменении температуры от 700 до 1250 К представлены на фиг. 1, $a - в$ соответственно. Видно, что во всем исследуемом диапазоне температур наилучшее согласие теории и эксперимента достигается при использовании предположения о независимости сечений ударного уширения от температуры ($b_c \sim 1/\sqrt{T}$) для смесей CO_2-N_2 . В то же время использование зависимости $b_c \sim T^{-1}$ приводит к существенному завышению теоретических значений k_v по сравнению с экспериментальными, которое для смесей CO_2-N_2 ($0,05-0,95$) достигает 100% .

Такая же тенденция имеет место и для других составов смеси CO_2-N_2 . Это иллюстрирует фиг. 2, где приведены зависимости $k_v = f(\gamma_{\text{CO}_2})$ для



Фиг. 1



Фиг. 2

двух рассматриваемых в работе зависимостей $b_c = f(T)$. Температура за фронтом ударной волны для всего диапазона содержания CO_2 ($\gamma_{\text{CO}_2} = 0,05 - 0,1$) в этом случае изменялась от 740 до 850 К, а давление от 0,216 до 0,266 атм.

Таким образом, проведенный в работе анализ изменения показателя поглощения за фронтом прямых ударных волн в зависимости от температуры и содержания молекулярного азота в смеси CO_2-N_2 показал, что наилучшее согласие между вычисленными и измеренными значениями показателя поглощения достигается при использовании зависимости $b_c \approx T^{-1/2}$, т. е. в предположении независимости сечений ударного уширения от температуры.

Авторы выражают благодарность С. А. Лосеву за интерес к работе и полезные обсуждения.

Поступила 25 V 1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюков А. С., Волков А. Ю., Кудрявцев Е. М., Сериков Р. И. Анализ данных по вероятностям спонтанного излучения и сечениям ударного уширения линий перехода $00^0_1 \rightarrow 10^0_0$ молекулы CO_2 . — Квант. электроника, 1976, т. 8, № 8.
2. Ely V., Mc Cubbin T. K. The temperature dependence of the self-broadened half-width of the P-20 line in the $00^0_1-10^0_0$ band of CO_2 . — Appl. Opt., 1970, vol. 9, N 5.
3. Leonard R. L. Measurements of small signal absorption at high temperature for the $00^0_1 \rightarrow 10^0_0$ band of CO_2 . — Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 8.
4. Strilechuk A. R., Offenberger. High temperature absorption in CO_2 at $10,6\mu$. — Appl. Opt., 1974, vol. 13, N 11.
5. Солоухин Р. И., Фомин И. А. Резонансное ($10,6\text{ мкм}$) поглощение CO_2 за фронтом ударной волны. — ПМТФ, 1977, № 1.
6. Бирюков А. С., Сериков Р. И., Старик А. М. Инверсия населенностей колебательных уровней за фронтом ударной волны. — Квант. электроника, 1978, 5, № 6.
7. Лосев С. А. Газодинамические лазеры. М., Наука, 1977.
8. Британ А. Б., Жилин Ю. В., Мазманянц А. П. Экспериментальное исследование запуска клиновидного сопла на ударной трубе большого диаметра. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1979, № 3.
9. Лосев С. А. О свертке информации, получаемой в экспериментах на ударных трубах. — Труды НИИМ МГУ, 1973, № 21.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ

КОЭФФИЦИЕНТА ИНТЕНСИВНОСТИ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРУГИХ ЗАДАЧАХ С ТРЕЩИНОЙ

С. Н. Васильковский, В. Д. Кургузов

(Новосибирск)

В отличие от излагаемых в [1] методов в данной работе предлагается метод решения плоских задач теории упругости с трещиной непосредственно в терминах напряжений, с одной стороны, и на основе метода конечных разностей, с другой. Следует заметить, что применение метода конечных элементов или метода конечных разностей само по себе не является сколько-нибудь существенным, так как существуют при специально выбранной аппроксимации доказательства эквивалентности этих двух основных численных методов [2,3], в то время как использование в качестве искоемых функций перемещений или напряжений представляется более существенным. Особенно полезна постановка задачи в напряжениях, когда граничные условия заданы также в напряжениях и требуется исследовать напряженное состояние в заданной области.

Будем рассматривать плоскую деформацию прямоугольного образца с краевой трещиной, которая распространяется в область от одной из боковых вертикальных границ параллельно двум горизонтальным сторонам