

3. Данилин Г. А. Асимптотическое решение уравнений Навье – Стокса для течения сжимаемой жидкости в плоском канале при интенсивном вдуве со стенок. Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, № 6.
4. Гришин А. М., Берцун В. Н. Итерационно-интерполяционный метод и теория сплайнов. Докл. АН СССР, 1974, т. 214, № 4.
5. Гершбейн Э. А. Ламинарный многокомпонентный пограничный слой при больших вдувах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1970, № 1.

УДК 532.526

ИЗМЕРЕНИЕ ПРОФИЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЦИАНА В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА МОДЕЛЯХ, РАЗРУШАЕМЫХ ТЕПЛОВЫМ ПОТОКОМ

Э. Б. ГЕОРГ, М. И. ЯКУШИН

(Москва)

В экспериментах на моделях, изготовленных из высокотемпературных материалов, которые помещались в нагретую до 8500° К воздушную струю, получено распределение концентрации радикала CN поперек пограничного слоя. Концентрация рассчитывалась по измеренной абсолютной интенсивности излучения вращательных линий CN с учетом профиля температур, полученного в работе [1]. Для нагрева воздуха использовался высокочастотный безэлектродный разряд.

Экспериментальная установка, безэлектродный высокочастотный плазматрон, на которой проводились исследования, подробно описана в [2]. Температура нагретого воздуха в рабочем сечении $T=8500^\circ\text{К}$, электронная концентрация $N_e=3\cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$, скорость потока $v=30\text{ м/сек}$, давление $P=1\text{ кг/см}^2$, диаметр струи 37 мм, суммарный тепловой поток к разрушаемой модели 0.4 квт/см^2 (конвективная часть 0.3 квт/см^2 , лучистая 0.1 квт/см^2). Рабочие газы — воздух и азот.

Исследовались модели из композитного пластика, которые имели плоскую форму с цилиндрической головной частью. Выбранная форма позволила получить в пограничном слое условия, близкие к одномерным вдоль линии наблюдения. Применялись модели длиной 3.3 см, шириной 3 см, с радиусом головной части 1.5 см. Они крепились в водоохлаждаемой державке, установленной на двухкомпонентном координатнике, который вводился в рабочее сечение струи, расположенное на высоте 10–15 мм от среза трубки.

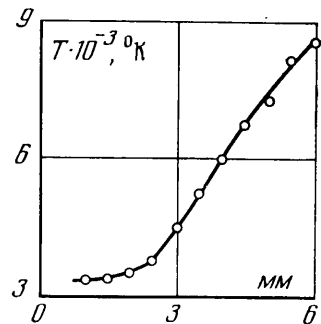
Спектральные измерения проводились на дифракционном спектрографе ДФС-13 с плоской решеткой 1200 штр/мм дисперсией 2 А/мм и рабочим диапазоном 2000–10000 А. Построение оптической системы и методика измерений описаны в [3]. Применение спектрографа ДФС-13 позволило получить спектры CN с разрешенной вращательной структурой.

В работе [4] измерены вращательная и колебательная температуры радикала CN, которые совпали в пределах точности эксперимента. На фиг. 1 дан измеренный профиль температуры поперек пограничного слоя. Для расчета концентрации CN измерялось распределение абсолютной интенсивности во вращательной структуре фиолетовой полосы CN (переход 0–1).

Интенсивности могут служить критерием концентрации радикалов CN в том случае, когда имеется уверенность, что возбуждение полностью обусловлено термическим механизмом. Интенсивность излучения отдельной вращательной линии при электронном переходе $B\rightarrow X$ в единичный телесный угол из слоя длиной l определяется выражением

$$(1) \quad I = \frac{1}{4\pi} h\nu_{BX} N_{Bv'K'} A_{Xv''K'}^{Bv'K'} l$$

Здесь ν_{BX} — частота электронного перехода, $N_{Bv'K'}$ — заселенность верхнего электронного колебательно-вращательного состояния, $A_{Xv''K'}^{Bv'K'}$ — вероятность электронного



Фиг. 1

колебательно-вращательного перехода, v', v'', K', K'' — колебательные и вращательные числа в верхнем и нижнем электронных состояниях.

При термическом равновесии заселенность электронного колебательно-вращательного уровня можно выразить через полное число молекул N в 1 см^3

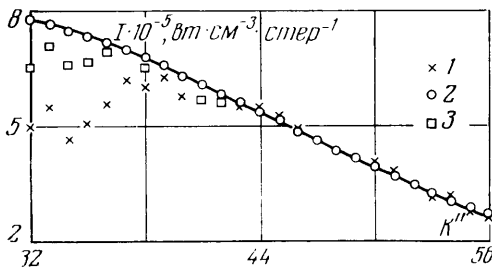
$$(2) \quad N_{v'v''K'K''} = \frac{N}{Z} \exp \left[-\frac{hc}{kT} (E_B + E_{v'} + E_{K'}) \right]$$

где Z — сумма по электронным, колебательным и вращательным состояниям молекулы, $E_B, E_{v'}, E_{K'}$ — энергии соответственно верхнего электронного, колебательного и вращательного уровней в см^{-1} . Постоянная $hc/k = 1.4388 \text{ см} \cdot \text{град}$.

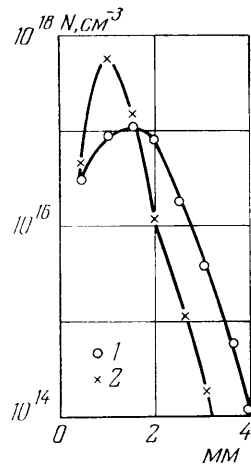
Вероятность перехода в сек^{-1}

$$(3) \quad A_{v'v''K'K''} = \frac{64\pi^4}{3hc^3} \nu_{v'v''K'K''}^3 |R_e^{v'v''}|^2 q_{v'v''} S_{K'K''}$$

где $|R_e^{v'v''}|^2$ — матричный элемент электронного перехода, определяющий абсолютную интенсивность излучения линии, $q_{v'v''}$ — фактор Франка — Кондона, характе-



Фиг. 2



Фиг. 3

ризирующий распределение интенсивности в колебательной структуре, $S_{K'K''}$ — фактор Хёнля — Лондона, характеризующий распределение интенсивности во вращательной структуре. Величина $|Re|^2$ определена экспериментально в работе [4]. Для CN $|Re|^2 = 0.37$ а. е. не зависит от междядерного расстояния и постоянна для всей фиолетовой системы полос. Факторы $q_{v'v''}$ и $S_{K'K''}$ вычисляются методами квантовой механики. Фактор $q_{v'v''} = 0.08$ (переход (0-1)) даётся в работе [5]. Фактор интенсивности для переходов ${}^2\Sigma \rightarrow {}^2\Sigma$ для P - и R -ветвей ${}^P S = 2K''$, ${}^R S = 2(K'' + 1)$ приведен в работе [6], из которой брались значения молекулярных констант. Подставляя (2) и (3) в (1), получим для интенсивности излучения отдельной вращательной линии при условии термического равновесия соотношение

$$(4) \quad I = \frac{16\pi^3}{3c^3 Z} \nu^4 N |Re|^2 q_{v'v''} S_{K'K''} \exp \left[-\frac{hc}{kT} (E_B + E_{v'} + E_{K'}) \right]$$

Формула (4) использовалась для определения концентрации CN по экспериментально измеренной величине интенсивности отдельной вращательной линии. О выборе линии сказано ниже. В условиях данного эксперимента ($T < 10\,000^\circ \text{K}$) пренебрежение вынужденным излучением приводит к незначительной ошибке в интенсивности.

Еще одним фактором, поправку на который следует рассмотреть, является самопоглощение. Оценка влияния эффекта самопоглощения проводилась на основе экспериментальных данных. В работе [1] найдена зависимость $\lg I = f(K''(K'' - 1))$ для всех сечений пограничного слоя, начиная с внутренней и кончая внешней границей паров. Эта зависимость несколько отклоняется от прямой для вращательных чисел $K'' \leq 42$.

Поскольку предполагается, что основным эффектом, приводящим к отклонениям логарифмических зависимостей интенсивности $\lg I = f(K''(K''-1))$ от прямой, является самопоглощение, было бы интересно рассмотреть распределение интенсивностей по вращательным уровням для каждого сечения. Такие распределения были найдены экспериментально для всех систем материал — газ. Так как характер их в общих чертах сходен, приведем в качестве примера наиболее интересное экспериментальное распределение интенсивностей во вращательной структуре CN в полосе (0—1) для одного сечения пограничного слоя воздуха на асбопластике (точки 1 на фиг. 2).

Для сравнения приведены расчетные зависимости — точки 2, вычисленные на ЭВЦМ по формуле (4). Для получения расчетных кривых распределения интенсивности во вращательной структуре по формуле (4) составлялась программа, которая предусматривала определение температуры и концентрации для данного распределения интенсивностей по экспериментальным значениям интенсивности линий, не подверженных очевидным возмущениям.

Отметим, что для $K \leq 42$ расчетные кривые идут несколько выше экспериментальных точек, причем это расхождение увеличивается в каждом сечении с уменьшением вращательного числа, а с увеличением номера сечения диапазон значений этих K и степень отклонения от расчетной кривой уменьшаются. Сравнение экспериментальных и расчетных распределений позволило найти вращательные линии с аномальным значением интенсивности, а введение поправки с учетом фактора самопоглощения дало исправленные значения интенсивностей (точки 3 на фиг. 2). Расчет концентрации проводился по линиям, свободным от переналожения, которые находились в хвосте P -ветви, с большими квантовыми числами.

На фиг. 3 показано изменение концентрации CN поперек пограничного слоя для системы воздух — асбопластик — точки 1 и системы асбопластик — азот — точки 2. Сходный характер зависимости указывает на идентичность механизмов образования радикала CN в этих средах. Наблюдается ярко выраженный максимум концентрации на некотором расстоянии от разрушаемой стенки. Как и следовало ожидать, концентрация CN максимальна в потоке азота. Спад концентрации CN при удалении от стенки начинается при температуре порядка $T = 4000^\circ \text{K}$. Очевидно, это связано с началом диссоциации CN, которая увеличивается с ростом температуры; энергия диссоциации CN $E \sim 7.6 \text{ эв}$ [7].

В работе [8] указаны предельные расчетные концентрации CN для полосы (0—1) при атмосферном давлении и различных температурах, начиная с которых сказывается эффект самопоглощения. Сравнение полученных экспериментальных данных с расчетными значениями показывает, что эффект самопоглощения сказывается на расстоянии 2.5 мм от стенки в случае воздушной и 1—1.5 мм в случае азотной плазмы. Таким образом, основным эффектом, искажающим распределение интенсивности по вращательным уровням в полосе, является реабсорбция.

Поступила 30 IX 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. Георг Э. Б., Якушин М. И. Температурный пограничный слой на моделях, разрушаемых высокоэнтальпийным потоком газа. Изв. АН СССР, МЖГ, 1975, № 1.
2. Георг Э. Б., Рулев Ю. К., Якушин М. И. Исследование теплового потока в передней критической точке тел, обтекаемых высокотемпературным дозвуковым потоком. Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, № 5.
3. Георг Э. Б., Рулев Ю. К., Сипачев Г. Ф., Якушин М. И. Измерение температурных профилей пограничного слоя на разрушающихся образцах в потоке воздушной плазмы. Изв. АН СССР, МЖГ, 1972, № 2.
4. Кудрявцев Е. М. Экспериментальное определение матричного элемента дипольного момента электронного перехода фиолетовой системы полос циана. Тр. ФИАН, 1966.
5. Nicholls R. W. The interpretation of intensity distributions in the CN violet, C_2 Swan, OH violet and O_2 Schumann-Runge band systems by use of their r -centroids and Frank-Condon factors. Proc. Phys. Soc., London, Ser. A., 1956, vol. 69, № 10.
6. Каменщиков В. А., Пластинин Ю. А., Николаев В. М., Новицкий Л. А. Радиационные свойства газов при высоких температурах. М., «Машиностроение», 1971.
7. Thomas N. Cyanogen flames and the dissociation energy of N_2 . J. Chem. Phys., 1952, vol. 20, No. 3.
8. Лесков Л. В., Васильева Л. П. О методе измерения температуры по полосатым спектрам молекул. Изв. АН СССР, Сер. физическая, 1958, т. 22, № 6.