



УДК 537.525

Р.К. Сафиуллин, Г.Н. Зайнашева

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДНЫХ КАМЕРАХ CO<sub>2</sub> ЛАЗЕРОВ С БЫСТРЫМ ПОТОКОМ ГАЗА

Развитие эффективных численных методов исследования основных процессов, происходящих в газоразрядных CO<sub>2</sub> лазерах, обусловлено поиском оптимальных режимов их работы. Несмотря на многолетние усилия в этом направлении, проблема эта не утратила своего значения и в настоящее время.

Данная работа посвящена численному моделированию процессов в разрядных камерах (РК) CO<sub>2</sub> лазеров с быстрым потоком газа. Исследования выполнены для условий продольного тлеющего разряда с РК в форме параллелепипеда. Рассмотрено двумерное течение в приближении узкого канала, использована шеститемпературная модель колебательной релаксации.

### Математическая модель и численный метод

Нами исследовались процессы в положительном столбе тлеющего разряда в узких проточных РК в форме параллелепипеда с гранями  $x=0, x=L, y=0, y=2b, z=0, z=c$  (рис. 1). Поток газа был направлен от катода к аноду. Рассматривался случай  $b/c \ll 1$ , поэтому предполагалась однородность процессов в направлении оси Z. Изучались процессы в лазерных смесях CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He-CO.

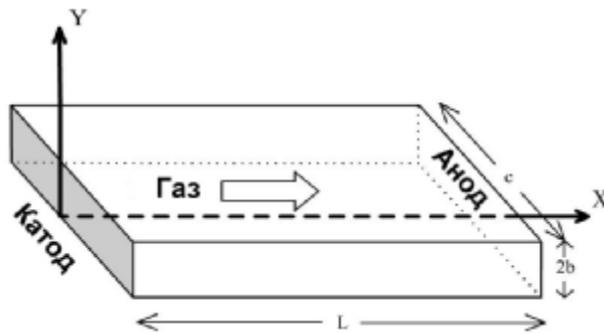


Рис.1. РК проточного CO<sub>2</sub> лазера

Для данных РК решалась следующая система уравнений:

$$\frac{\partial ru}{\partial x} + \frac{\partial rv}{\partial y} = 0, \quad (1)$$

$$ru \frac{\partial u}{\partial x} + rv \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} m \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (2)$$

$$c_p ru \frac{\partial T}{\partial x} + c_p rv \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} l \frac{\partial T}{\partial y} + m \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 +$$

$$+ u \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mathbf{r r}}{djE} + j (E_1, E_2, E_3, E_4, E_5) \quad (3)$$

$$p = NkT, \quad (4)$$

$$G = 2c \cdot \int_0^b rudy, \quad (5)$$

$$I = 2c \cdot eEm_e \int_0^b ndy, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} D_a \frac{\partial n_e}{\partial y} - \frac{\partial n_e u}{\partial x} - \frac{\partial n_e v}{\partial y} + n_i n_e - bn_e^2 + q = 0, \quad (7)$$

$$u \frac{\partial E_i}{\partial x} + v \frac{\partial E_i}{\partial y} = k_i \frac{\mathbf{r r}}{jE} + f_i(T, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5),$$

$$(i = 1 \div 5). \quad (8)$$

Здесь  $v$  и  $m$  - вертикальная компонента скорости потока и динамическая вязкость газовой смеси, соответственно;  $d$  - часть мощности накачки, идущая в поступательно-вращательные степени свободы молекул;  $b$  - полувысота,  $c$  - ширина РК;  $I$  - полный ток;  $m_e$  - подвижность электронов;  $D_a$  - коэффициент амбиполярной диффузии электронов;  $n_i$  - частота ионизации;  $b$  - коэффициент электрон-ионной рекомбинации;  $E_i$  - энергия  $i$ -й колебательной моды, приходящаяся на единицу объема;  $k_i$  - часть энергии накачки, которая поступает в  $i$ -ю колебательную моду ( $i = 5$  соответствует колебательной моде компоненты CO).

Уравнения колебательной кинетики (8) записаны в шеститемпературном приближении. Они включают конвективный и диффузионный перенос колебательной энергии, а также возбуждение колебаний молекул электронами и (V-V), (V-V'), (V-T) - процессы. Функции  $f_i$  и  $k_i$  зависят также от скоростей (V-V), (V-V') и (V-T)-процессов. Они могут быть получены в соответствии с [1].

Начальные и граничные условия ставились следующим образом. На входе в РК полагалось, что:

$$T|_{x=0} = T(0,y), \quad u| = u(0,y), \quad v| = 0, \\ n_e| = n_e(0,y), \quad E| = E_0. \quad (9)$$

Считалось, что на входе в РК колебания молекул возбуждены равновесно. На нижней стенке РК полагалось, что

$$u| = 0, \quad v| = 0, \quad n_e/N| = 10^{-10}, \quad T_1(x,0) = T_2(x,0) = T(x,0),$$

$$\frac{\partial T_3}{\partial y}(x,0) = \frac{\partial T_4}{\partial y}(x,0) = \frac{\partial T_5}{\partial y}(x,0) = 0. \quad (10)$$

На плоскости симметрии ( $y = b$ ) ставились условия:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial n_e}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial E_1}{\partial y} = \frac{\partial E_2}{\partial y} = \frac{\partial E_3}{\partial y} = \frac{\partial E_4}{\partial y} = \frac{\partial E_5}{\partial y} = 0, \\ v = 0. \quad (11)$$

Вязкость и коэффициент теплопроводности газовой смеси рассчитывались по формулам, приведенным в [2]. Их температурные зависимости были взяты в виде

$$\frac{m}{m_0} = \frac{l}{l_0} = (T/T_0)^{0.7}, \quad l_0 = l(T_0), \quad m_0 = m(T_0). \quad (12)$$

Уравнения (1-3, 7-8) могут быть представлены в виде

$$a_i \frac{\partial f_i}{\partial x} + b_i \frac{\partial f_i}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left( c_i \frac{\partial f_i}{\partial y} \right) + d_i + e_i f_i, \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (13)$$

$$\frac{\partial ru}{\partial x} + \frac{\partial rv}{\partial y} = 0. \quad (14)$$

Здесь коэффициенты  $a_i, b_i, c_i, d_i, e_i$  могут зависеть от функций  $f_j$  и от производных от функций  $f_k$  ( $k \neq i$ ).

Уравнения (13) аппроксимировались по неявной схеме [3]. При этом решение системы сводилось к скалярным прогонкам с итерациями ввиду нелинейности уравнений (13). В расчетах использовалось от 3 до 6 итераций на каждом шаге по координате  $x$ .

### Результаты и обсуждение

Ниже представлены некоторые результаты расчетов для смеси  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He}:\text{CO} = 1:2:3:0,25$ . На входе в РК задавалось:  $T(0,y) = 300 \text{ K}$ ,  $p = 20 \text{ Тор}$ ,  $u = 100 \text{ м/с}$ . Расчеты показали, что в рамках шеститемпературной модели получается заметное различие между температурами симметричной и деформационной колебательных мод  $\text{CO}_2$ . Как было отмечено в работе [2], в подобной модели приходится сталкиваться с проблемой “жесткости” уравнений колебательной кинетики. В наших расчетах это проявлялось в том, что в области  $0 \leq x \leq 0.3 \text{ см}$  рассчитываемые величины испытывали значительные затухающие колебания. Эта область на приведенных графиках не показана. Как видно из рис. 3-4, почти всюду в РК на плоскости симметрии ( $y = b$ )  $T_3 > 1500 \text{ K}$  и имеет место значительная инверсия населенностей.

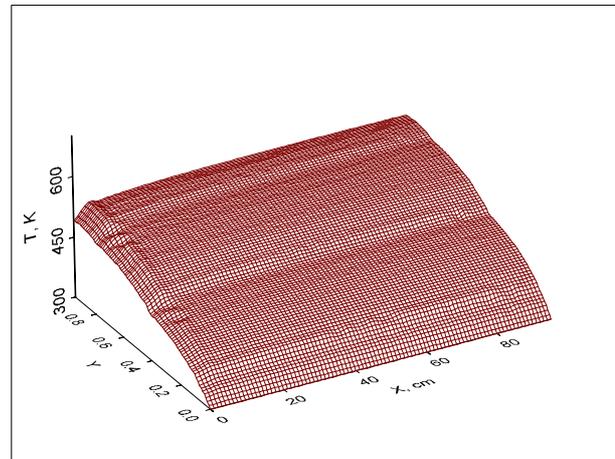


Рис. 2. Распределение поступательно-вращательной температуры газа внутри РК

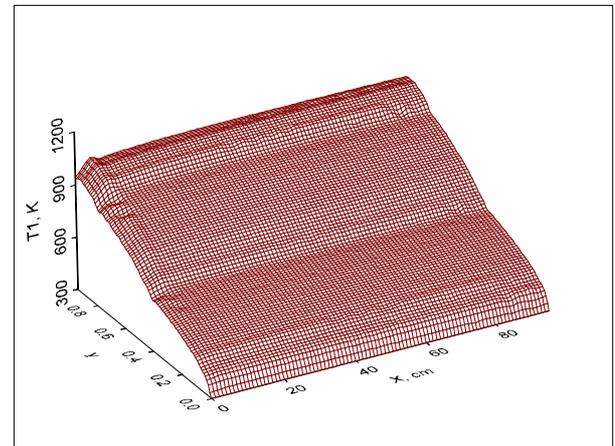


Рис. 3. Поле температуры симметричной колебательной моды (V00)  $\text{CO}_2$  внутри РК

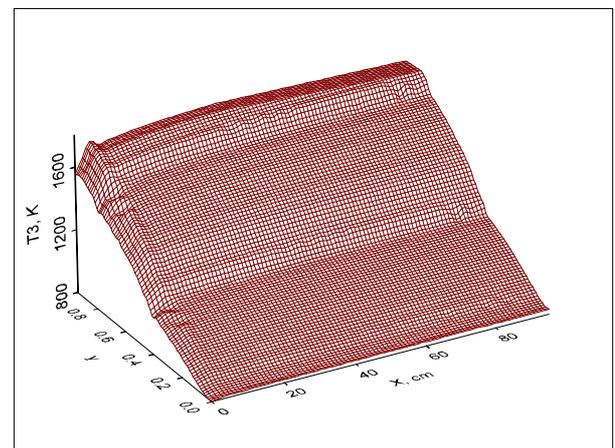


Рис. 4. Поле температуры асимметричной колебательной моды (00V)  $\text{CO}_2$  внутри РК



### Выводы

В работе показано, что в отличие от трех- и четырехтемпературных моделей использование шеститемпературной модели колебательной релаксации приводит к тому, что различие температур деформационной и симметричной колебательных мод  $\text{CO}_2$  достигает более 100 К. При этом “жесткость” системы уравнений колебательной кинетики значительно повышается ввиду сильного расширения иерархии учитываемых времен колебательной релаксации. Это приводит к довольно сильным колебаниям рассчитываемых параметров системы в начальной области РК. Получены двумерные распределения колебательных и газовой температур, а также степени ионизации газа внутри РК.

### Литература

1. Смит К., Томсон Р. Численное моделирование газовых лазеров. М.: Мир, 1981.- 516 с.
2. Sazhin S., Wild P., Leys C., Toebaert D., Sazhina E. The three temperature model for the fast-axial-flow  $\text{CO}_2$  laser. // J.Phys.D: Appl.Phys, 1993, V. 26, pp. 1872-1883.
3. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984.- 286 с.