

УДК 536.46:533.6+534.222.2

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ В ХИМИЧЕСКОМ ЛАЗЕРЕ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ  
НА СМЕСИ ВОДОРОДА И ФТОРА

В. А. ПОСПЕЛОВ

(Ленинград)

Излагается метод расчета химического лазера непрерывного действия на смеси водорода и фтора (HF) на основе модели мгновенного смешения. Уравнения одномерного движения реагирующей смеси в канале переменного сечения с учетом излучения имеют вид [1]

$$(1) \quad \rho u \frac{du}{dx} = - \frac{dp}{dx}$$

$$(2) \quad \rho u \frac{dH}{dx} = -u \frac{dp}{dx} - \sum_{(v)} \alpha_v I_v$$

$$(3) \quad \rho u A = \text{const}$$

$$(4) \quad \rho u \frac{dc_i}{dx} = w_i, \quad i \neq \text{HF}(v)$$

$$(5) \quad \rho u \frac{dc_i}{dx} = w_i - \frac{M_{\text{HF}}}{hN_A} \left[ \frac{\alpha_v I_v}{\nu_v} - \frac{\alpha_{v+1} I_{v+1}}{\nu_{v+1}} \right], \quad i = \text{HF}(v)$$

$$(6) \quad \frac{p}{\rho} = \frac{RT}{M}$$

Здесь  $x$  — координата вдоль оси канала;  $u$  — скорость в направлении  $x$ ;  $\rho$  — плотность;  $p$  — давление;  $H$  — энтальпия;  $M$  — молекулярный вес смеси;  $c_i$  — массовая концентрация  $i$ -й компоненты;  $w_i$  — массовая скорость образования  $i$ -й компоненты в результате химических реакций;  $A$  — сечение канала;  $N_A$  — число Авогадро;  $M_{\text{HF}}$  — молекулярный вес HF;  $h$  — постоянная Планка;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $\alpha_v$ ,  $I_v$ ,  $\nu_v$  — коэффициент усиления, интенсивность и частота излучения на переходе  $(v, J_v) \rightarrow (v-1, J_{v+1})$ , где  $\nu$ ,  $J_v$  — колебательное и вращательное квантовые числа. Уравнения концентраций (4) и (5) относятся к неизлучающим и излучающим компонентам; второй член в правой части (5) представляет собой массовую скорость образования компоненты под действием излучения.

В режиме генерации коэффициент усиления равен величине, определяемой параметрами системы

$$(7) \quad \alpha_v = E_v (c_v - \lambda_v c_{v-1}) = \alpha_0$$

$$(8) \quad \alpha_0 = - \frac{\ln(r_0 r_l)}{2l}$$

Здесь  $l$  — размер канала в поперечном направлении;  $r_0$ ,  $r_l$  — коэффициенты отражения зеркал; выражения для  $E_v$  и  $\lambda_v$  приведены в [2]. Для интегрирования системы (1) — (6) в [1] применяется метод, основанный на получении необходимых соотношений для определения интенсивностей  $I_v$  в результате дифференцирования равенств (7). Подробное изложение данного метода можно найти в [3].

В [4] предложен более простой с вычислительной точки зрения приближенный метод определения интенсивности при наличии одного перехода для импульсного DF-CO<sub>2</sub>-лазера. Считая, что  $I = \text{const}$  на одном шаге, приближенно находят параметры в точке  $(x+\Delta x)$ , используя в качестве первой оценки

$$(9) \quad I^{(1)} = I(x)$$

Если при этом  $\alpha^{(1)}(x+\Delta x) \neq \alpha_0$  с необходимой точностью, то интегрирование повторяется с использованием второй оценки

$$(10) \quad I^{(2)} = I^{(1)} \{1 + \delta \text{sign} [\alpha^{(1)}(x+\Delta x) - \alpha_0]\}$$

где для  $\delta$  в [4] рекомендуется значение 0.05. В дальнейшем итерации строятся в соответствии с равенством

$$(11) \quad I^{(3)} = B\alpha_0 + D, \quad B = \frac{I^{(2)} - I^{(1)}}{\alpha^{(2)} - \alpha^{(1)}}, \quad D = I^{(1)} - \frac{I^{(2)} - I^{(1)}}{\alpha^{(2)} - \alpha^{(1)}} \alpha^{(1)}$$

Применение этого метода к интегрированию системы (1) - (6) показало, что при наличии одного перехода требуется 2-3 итерации, при двух переходах число итераций резко возрастает, а при трех и более процесс не всегда сходится вследствие взаимного влияния соседних переходов. Для улучшения сходимости величины  $I_v$  определялись с использованием соотношения

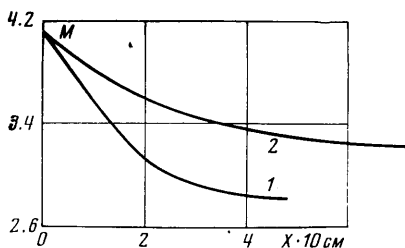
$$(12) \quad I_v = A_v \alpha_{v-1} + B_v \alpha_v + C_v \alpha_{v+1} + D_v$$

где коэффициенты  $A_v$  и  $C_v$  не равны нулю, если происходит генерация на переходах  $v-1 \rightarrow v-2$  и  $v+1 \rightarrow v$  соответственно. Проверка выявила хорошую сходимость метода. Сравнение с точными решениями [4] показало, что совпадение вполне удовлетворительное: максимальная погрешность не превышает 5%.

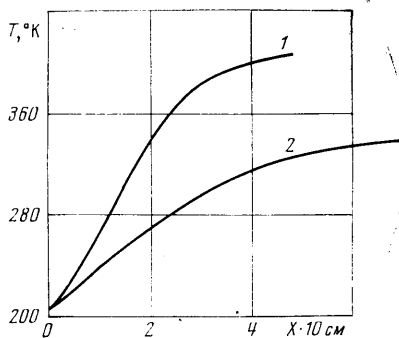
С помощью описанной методики были проведены расчеты, иллюстрирующие влияние степени диссоциации фтора и весовой доли разбавителя гелия на выходные параметры лазера. В качестве исходных величин задавались числа

$$\delta = Y_{F_2} / Y_{D_2}, \quad \psi = Y_{He} / (Y_{F_2} - Y_{D_2})$$

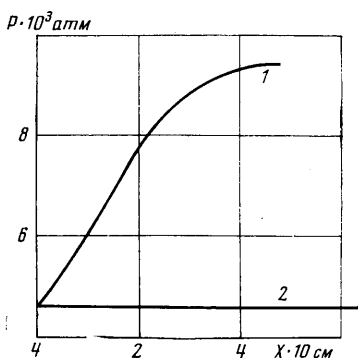
где  $Y_{F_2}$ ,  $Y_{D_2}$ ,  $Y_{He}$  - мольные расходы фтора, дейтерия и гелия, подаваемых в камеру сгорания. Предполагалось, что течение в сопловом блоке адиабатическое, одномерное, невязкое, химические реакции заморожены. Степень расширения фторного сопла 14, водородного 6, отношение площадей выходного сечения фторного и водородного сопел задавалось равным 1.75. Температура торможения водорода прини-



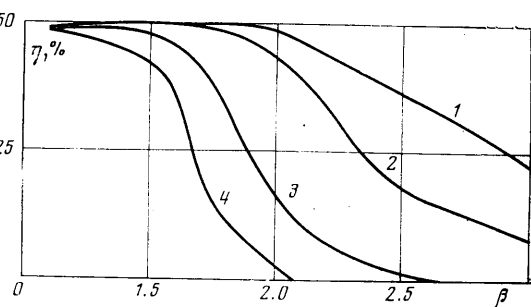
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

малась равной 300° К. Продукты сгорания, поступающие в резонатор, сразу за выходом из соплового блока смешивались с водородом. Форма канала резонатора задавалась различной.

На фиг. 1–3 показаны распределения числа Маха, температуры и давления в пределах активной зоны в случаях, когда площадь сечения  $A = \text{const}$  (кривые 1) и когда сечение изменяется так, что давление остается постоянным (кривые 2). Как видно из графиков, в первом случае зона генерации более короткая, температура растет значительно быстрее и соответственно число Маха падает более резко, чем в случае  $p = \text{const}$ .

На фиг. 4 представлены результаты расчетов коэффициента полезного действия при давлении в камере сгорания, равном 1 атм,  $\alpha_0 = 0.527 \text{ м}^{-1}$ ,  $A = \text{const}$ ,  $\psi = 5, 10, 20, 30$  (кривые 1–4 соответственно). К.п.д. определялся отношением выходной мощности лазера к величине  $Q_F m_F + Q_{F_2} m_{F_2}$ , где  $m_F$ ,  $m_{F_2}$  – массовые расходы F и F<sub>2</sub>,  $Q_F$  и  $Q_{F_2}$  – тепловыделение на единицу массы F и F<sub>2</sub> при реакции с водородом. Как видно из фиг. 4, максимальный к.п.д. наблюдается при малых значениях избытка фтора  $\beta$  и небольшом количестве разбавителя  $\psi$ . При этих условиях температура в камере сгорания велика, степень диссоциации фтора близка к единице и накачка осуществляется путем реакции



где HF(v) – колебательно-возбужденные молекулы HF. Увеличение  $\beta$  и  $\psi$  приводит к снижению температуры смеси, при этом возрастает доля молекулярного фтора и увеличивается роль накачки с помощью цепного механизма



Представленные результаты показывают, что при данных условиях вследствие малой начальной температуры скорость накачки с помощью цепного механизма становится неконкурентоспособной со скоростью колебательной релаксации HF(v) на HF, DF, что приводит к снижению к.п.д.

В заключение заметим, что хотя модель мгновенного смешения дает сильно завышенные значения к.п.д., она с успехом может быть использована для оперативной оценки сравнительной эффективности различных топливных композиций.

Поступила 18 X 1976

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Emanuel G., Cohen N., Jacobs T. A. Theoretical performance of an HF chemical CW laser. J. Quant. Spectroscopy and Radiat. Transfer, 1973, vol. 13, No. 12.
2. Кинг, Майрелл. Теоретическое исследование диффузионных химических лазеров. Ракетная техника и космонавтика, 1972, т. 10, № 12.
3. Turner E. B., Adams W. D., Emanuel G. Numerical formulation for constant-gain chemical laser calculations. J. Comput. Phys., 1973, vol. 11, No. 1.
4. Pirkle J. C., Pockler T. O., Sigillito V. G. Numerical procedure for a pulsed DF—Co<sub>2</sub> transfer laser. J. Comput. Phys., 1974, vol. 15, No. 2.