

- [6] H a r t f u s s H.J., T u t t e r M. – Int. J. Infra-  
red and Milimeter Waves, 1983, v. 4, N 6, p. 993-1014.
- [7] Г у д к о в А.Л., К у л и к о в В.А., Л а п т е в В.Н.,  
М а т в е е ц Л.В., М а х о в В.И. – Письма в ЖТФ, 1986,  
т. 12, № 9, с. 527-533.

Институт радиотехники  
и электроники АН СССР,  
Москва

Поступило в Редакцию  
20 августа 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 7

12 апреля 1988 г.

ФОРМИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИ АКТИВНОЙ СРЕДЫ  
ПРИ СМЕЩЕНИИ КОЛЕБАТЕЛЬНО-НЕРАВНОВЕСНОГО  
 $N_2$  И СМЕСИ  $CO_2/H_2O$  В СИСТЕМЕ  
СВЕРХЗВУКОВЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СТРУЙ

В.Ф. Л е б е д е в

Особенность образования инверсии населенностей при смешении струй колебательно-возбужденного  $N_2$  и  $CO_2/H_2O$  заключается в одновременном протекании процессов колебательной релаксации и выравнивания газодинамических параметров потока. При умеренных степенях колебательной неравновесности ( $T_v \approx 2000$  К) возможно их раздельное рассмотрение и исследование [1]. Важную роль при этом могут сыграть параметры подобия, а наибольший интерес, по-видимому, представляют соотношения подобия для измеряемых величин, в частности при исследовании релаксационных процессов – для коэффициента усиления слабого сигнала  $K_y$ .

Анализ выражения для коэффициента усиления с использованием простейшей модели релаксации одного блока [1] позволяет выявить в движущейся однородной трехкомпонентной среде  $N_2/CO_2/H_2O$  приближенный параметр подобия вида:

$$\xi_c^2 (\exp(\theta/T_{v0}) - 1)^{-1} P_0 / \sqrt{T_0} x, \quad (1)$$

где  $\xi_c$  – мольная доля  $CO_2$  в смеси (мольная доля  $H_2O$  предполагается постоянной);  $T_{v0}$  – колебательная температура, характеризующая начальную неравновесность смеси;  $P_0$  и  $T_0$  – соответственно характерные давления и температура;  $x$  – продольная координата. Следует отметить, что введение в параметр подобия характерного давления  $P_0$ , а также комплекса с  $T_{v0}$  в виде (1) справедливо для чисто столкновительного режима уширения спектральных линий и при неучете заселенности нижних уровней симметричного и деформационного типов колебаний молекулы  $CO_2$ .

Обработка экспериментальных данных по измерению коэффициента усиления за срезом блока осесимметричных сопел, реализующего

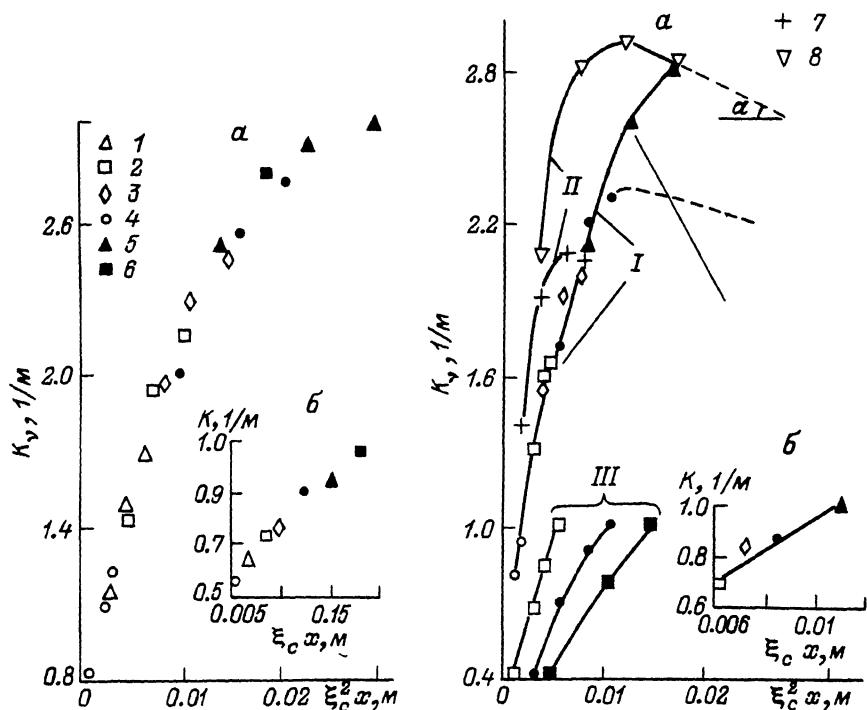


Рис. 1. Зависимость экспериментальных значений  $K_y$  от параметра подобия (а), вблизи среза сопел (б) ( $x=0.038$  м). Мольные доли  $CO_2 - \xi_c$ : 0.13-0.018 (1), 0.23 (2), 0.28 (3), 0.33 (4), 0.4 (5), 0.46 (6).

Рис. 2. Зависимость расчетных значений  $K_y$  от параметра подобия (а), вблизи среза сопел (б) ( $x=0.025$  м). I - модель турбулентности Акатнова, II - Прандтля, III - ламинарное смешение,  $\xi_c$ : 0.28 (7, 3), 0.4 (8, 5), остальные обозначения см. рис. 1.

смешение в системе параллельных сверхзвуковых струй  $N_2$  и  $CO_2/H_2O$  [2], показала работоспособность комплекса  $\xi_c^2 x$  и в зоне смешения (рис. 1, а). В этих экспериментах поддерживались постоянными давление и температура торможения  $N_2$  ( $P_0=1$  МПа,  $T_0=2000$  К), а также мольная доля  $H_2O$  в результирующем потоке ( $\xi_H=0.01$ ). Концентрация  $CO_2$  варьировалась от 0.13 до 0.45, а измерение коэффициента усиления производилось в сечениях потока с координатами 0.038, 0.09, 0.144, 0.196 м. Выяснилось также и наличие участка потока вблизи среза сопел блока ( $x=0.038$  м), где коэффициент усиления пропорционален  $\xi_c$  (рис. 1, б).

Область применения параметра подобия (1) наиболее достоверно (вследствие ограниченного объема имеющихся экспериментальных данных) может быть определена только расчетным путем. Однако существующие математические модели не позволяют провести точный количественный анализ пространственного течения вязких сверхзвуковых разнородных струй за срезом блока осесимметричных сопел. Поэтому естественно рассмотрение ряда наиболее распространенных моделей, а именно: модели мгновенного смешения, квазиодномерной феноменологической модели смешивания [3] и модели на основе двумерных упрощенных уравнений Навье–Стокса [4]. Газодинамические и геометрические характеристики струй  $N_2$  и  $CO_2/H_2O$  выбирались наиболее близкими к экспериментальным данным работы [2]. Значения коэффициента усиления, полученного по различным моделям, сравнивались между собой и качественно сопоставлялись с измеренными значениями в работе [2].

Результаты расчетов с применением уравнений Навье–Стокса и различными моделями турбулентности представлены на рис. 2. Видно, что наилучшее, относительно экспериментальных значений, описание коэффициента усиления в активной среде достигается при использовании модели турбулентности Акатнова [5]. При этом сохраняются особенности формирования усилительных свойств среды вблизи среза сопел (рис. 2, б), что справедливо и для феноменологической модели смешения. Для этой же зоны течения значения, получаемые с помощью алгебраической модели Прандтля, качественно близки к результатам расчетов по модели мгновенного смешения: существенно выше экспериментальных, а отличие от последних увеличивается с ростом  $\xi_c$ . Ламинарный режим смешения даже качественно не отражает экспериментально наблюдаемых тенденций изменения  $K_y$  в среде, т. е. наличие параметра подобия в данном случае позволило судить о режиме течения. Существование бинарного параметра подобия  $P_0 x$  или  $P_0 L$  для зоны смешения и для однородной среды соответственно, где  $L$  – длина смешения струй  $N_2$  и  $CO_2/H_2O$ , следует из результатов работы [6].

Расчеты подтвердили и достоверность для зоны смешения параметра подобия в виде (1), причем в качестве характерных величин для давления и температуры могут быть взяты давление и температура торможения азота. Однако расчеты показали и ограничение области применения параметра подобия сечением потока  $x_{max}$ , в котором коэффициент усиления достигает максимальной величины  $K_{y_{max}}$ , а расчетное значение  $x_{max}=0.1$  м существенно меньше зафиксированного в экспериментах [2] ( $x_{max}=0.196$  м). С ростом  $P_0$ ,  $T_0$  или  $T_{y0}$  происходит смещение сечения  $x_{max}$  к срезу струй  $N_2$  и  $CO_2/H_2O$ , однако меньшее, чем следует из расчетов. Далее вниз по потоку кривые, описывающие продольные распределения коэффициента усиления, расходятся (прерывистые линии на рис. 2), но и здесь, в частности при использовании параметра подобия  $\xi_c^2 x$ , возможно обобщенное описание  $K_y$  выражением вида:  $K_y = K_{y_{max}} - (x - x_{max}) \operatorname{tg} \alpha$ .

Таким образом, формирование усилительных свойств активной среды в процессе смешения сверхзвуковых параллельных струй колебательно-неравновесного  $N_2$  и смеси  $CO_2/H_2O$  может быть проанализировано с помощью приближенного параметра подобия (1). Это позволяет путем обобщения серии экспериментальных или расчетных данных выявить возможности конкретной схемы смешения, а также оценить адекватность эксперименту применяемых расчетных моделей.

Автор благодарен С.С. Харченко за полезное обсуждение результатов работы.

### Л и т е р а т у р а

- [1] Красицкая Л.С., Непартович А.П., Шарков В.Ф. - ТВТ, 1973, т. 11, № 6, с. 1155-1161.
- [2] Yu G., Wu C.B., Wu C.K. - AIAA-paper, 1983, N 1703.
- [3] Борейшо А.С., Лебедев В.Ф., Лобачев В.В., Морозов А.В. - ИФЖ, 1984, т. 47, № 1, с. 53-59.
- [4] Лавров А.В., Михайлова Е.Т., Харченко С.С. - ЧММСС, 1982, т. 13, № 5, с. 141-146.
- [5] Акатнов Н.И. - МЖГ, 1982, № 6, с. 17-25.
- [6] Борейшо А.С., Лавров А.В., Лебедев В.Ф., Харченко С.С. - ИФЖ, 1987, т. 52, № 1, с. 90-95.

Ленинградский механический  
институт им. Маршала Советского  
Союза Д.Ф. Устинова

Поступило в Редакцию  
10 августа 1987 г.