

**ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ РЕАГИРУЮЩИХ КОМПОНЕНТОВ  
НА МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ИНВЕРСНОЙ ЗАСЕЛЕННОСТИ  
В ГАЗОДИНАМИЧЕСКОМ ЛАЗЕРЕ  
НА СМЕСИ  $\text{CO} + \text{N}_2\text{O} + (\text{N}_2 + \text{He})$**

*Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков, И. Б. Светличный*

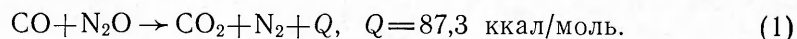
(Москва)

Реагирующие смеси на основе окиси углерода и закиси азота успешно используются для создания исходного рабочего тела  $\text{CO}_2$ -лазера [1—3]. Концентрация реагирующих компонентов в смесях  $\text{CO} + \text{N}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{He}$  определяет кинетику энерговыделения, конечную температуру и состав продуктов химических превращений в предопловом объеме. В то же время молекулы окиси углерода и закиси азота непосредственно участвуют в колебательном энергообмене при введении их в активные среды  $\text{CO}_2$ -лазеров [4, 5].

Существенная особенность процессов колебательного энергообмена в химически реагирующих средах связана с возможностью образования колебательно возбужденных частиц в ходе химических превращений. С этой точки зрения участие молекул окиси углерода и закиси азота в процессе образования активной среды  $\text{CO}_2$ -лазера не ограничивается тривиальной ролью источника тепловой энергии и исходного материала для образования углекислого газа и азота в ходе химических превращений. Таким образом, исследование сложного и многообразного влияния концентрации реагирующих компонентов на колебательный энергообмен в продуктах реакции  $\text{CO} + \text{N}_2\text{O}$  представляет интерес как в фундаментальном, так и в прикладном аспекте.

В данной работе проведено изучение механизма образования инверсной заселенности в ГДЛ на смеси  $\text{CO} + \text{N}_2\text{O} + (\text{N}_2 + \text{He})$  при различном содержании реагирующих компонентов ( $\text{CO}$  и  $\text{N}_2\text{O}$ ). В этих исследованиях определялись колебательные температуры асимметричной ( $T_3$ ) и симметричной ( $T_2$ ) мод углекислого газа, что позволяет восстанавливать заселенности обоих уровней лазерного перехода ( $001 \rightarrow 100$ ) в  $\text{CO}_2$ .

Метод измерения колебательных температур  $T_3$  и  $T_2$  основан на одновременной регистрации коэффициента усиления излучения зондирующего  $\text{CO}_2$ -лазера на длине волны  $\lambda = 10,6$  мкм и интенсивности спонтанного излучения молекул  $\text{CO}_2$  в полосе 4,3 мкм. Теория метода изложена в [6]. Кинетика химических превращений в реакции  $\text{CO} + \text{N}_2\text{O}$  изучалась в [7—10]. Анализ данных по константам скоростей элементарных стадий этой реакции показывает, что в области умеренных температур  $T \leq 2100 \div 2400$  К при взаимодействии  $\text{CO} + \text{N}_2\text{O}$  образуются молекулы  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$  — основа рабочей среды  $\text{CO}_2$ -лазеров. В этих условиях схема brutto-реакции имеет вид



При более высоких температурах происходит уменьшение количества образующихся молекул  $\text{CO}_2$ . Одновременно в продуктах химических превращений увеличивается содержание побочных для активной среды  $\text{CO}_2$ -лазера веществ — молекул  $\text{O}_2$  и  $\text{NO}$ . Оценки показывают, что концентрация молекул  $\text{O}_2$  и  $\text{NO}$  при  $T = 2500 \div 2600$  К достигает 10—40% от начального содержания закиси азота  $\xi_{\text{N}_2\text{O}}^0$  или 1—4% от общего числа молекул в смеси при типичном для ГДЛ значении  $\xi_{\text{N}_2\text{O}}^0 = 10\%$ . Согласно [11, 12], молекулы  $\text{O}_2$  и  $\text{NO}$  в таких количествах

практически не оказывают значительного влияния на образования инверсной заселенности в смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$ . Незначительное содержание в продуктах химических превращений  $\text{CO} + \text{N}_2\text{O}$  побочных для активной среды  $\text{CO}_2$ -лазеров веществ является существенным достоинством данной реакции.

Исследования проводились на установке типа импульсного ГДЛ на ударной трубе с соплом на торце, описанной в [6]. Использовалось клиновидное сопло Лаваля с высотой критического сечения  $h_* = 1,5$  мм, полууглом раскрытия  $\varphi = 22,5^\circ$  и степенью расширения потока  $h/h_* = 33$ . Измерения проводились в двух сечениях сверхзвукового потока, расположенных на расстояниях  $L = 140$  и  $350$  мм от плоскости критического сечения сопла. Химические реакции осуществлялись за отраженной от торца трубы ударной волной. Контроль за протеканием химических реакций проводился посредством регистрации интенсивности ИК-излучения ( $\lambda = 4,6 \div 5,2$  мкм) из предсоплового объема.

В данной работе измерения коэффициента усиления  $K_0$ , относительной инверсной населенности лазерных уровней молекулы  $\text{CO}_2$   $\Delta N = \frac{N_{001} - N_{100}}{N_{\text{CO}_2}}$  и колебательных температур  $T_3$  и  $T_2$  проводились в широком диапазоне изменения температуры газа в предсопловом объеме. Существенная методическая особенность работы состоит в том, что давление газа поддерживалось от опыта к опыту практически постоянным. Это достигалось выбором соотношения концентраций компонентов толкающей смеси газов — водорода и азота — и начального давления исследуемого газа  $p_1$  в секции низкого давления. Выбор соотношения компонентов в толкающем газе и начального давления в исследуемом газе проводился на основании предварительного расчета. Из элементарной одномерной теории стационарных ударных волн известно, что  $T_5$  и величина отношения давления за отраженной ударной волной к начальному давлению в исследуемом газе  $P_{51} = p_5/p_1$  являются функциями числа Маха падающей ударной волны. Таким образом, эти величины параметрически связаны между собой. В данном рассмотрении индексы 1, 4, 5 отмечают состояния газа в секциях низкого и высокого давления ударной трубы перед разрывом диафрагмы между ними и за отраженной ударной волной в так называемой «горячей пробке».

Расчет производился в следующем порядке. На основании законов сохранения в падающих и отраженных ударных волнах с учетом колебательного возбуждения молекул определялись и графически строились зависимости  $T_5(M)$  и  $P_{51}(M)$ . Задаваясь требуемым значением температуры по зависимости  $T_5(M)$ , определялось значение числа Маха падающей ударной волны. Далее, по найденному значению  $M$  и требуемой величине давления за отраженной ударной волной  $p_5$ , их зависимости  $P_{51}(M)$  определялось начальное давление в исследуемой смеси газов  $p_1$ .

В рамках элементарной теории ударной трубы число Маха падающей ударной волны и отношение давления  $P_{14} = p_1/p_4$  и скоростей звука  $C_{14} = c_1/c_4$  в газах, наполняющих секции низкого и высокого давления ударной трубы, связаны соотношением [13].

$$C_{14} = \frac{\gamma_1 + 1}{\gamma_4 - 1} \left\{ 1 - \left[ P_{14} \left( \frac{2\gamma_1}{\gamma_1 + 1} M^2 - \frac{\gamma_1 - 1}{\gamma_1 + 1} \right) \frac{\gamma_4 - 1}{2\gamma_4} \right] \left( M - \frac{1}{M} \right)^{-1} \right\}. \quad (2)$$

Здесь  $\gamma = c_p/c_v$  — отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме. Для использованной в данной работе толкающей смеси азот — водород  $\gamma = 7/5$ . Величина  $p_4$  определяется прочностью используемых диафрагм, поэтому (2) позволяет вычислить отношение скоростей звука  $C_{14}$ , при котором падающая ударная волна имеет требуемое значение  $M$  при движении ее в исследуемом газе с на-

чальным давлением  $p_1$ . Концентрацию азота в смеси «толкающих» газов можно определить, воспользовавшись формулой для скорости звука в идеальном газе  $c = \sqrt{\gamma RT/\mu}$ ,

$$\xi_{N_2} = \frac{\mu_1 \gamma_1}{26 \gamma_1} C_{14}^2 - \frac{1}{13}, \quad 0 \leq \xi_{N_2} \leq 1,0.$$

Здесь  $R$  — газовая постоянная;  $\mu$  — молекулярный вес исследуемой смеси газов в секции низкого давления. Экспериментальное определение давления и температуры газа за отраженной ударной волной проводилось по измерениям скорости падающей волны и мало отличалось от результатов предварительного расчета. Учет дополнительного разогрева газа за отраженной ударной волной вследствие протекания химических превращений проводился на основании данных по тепловому эффекту реакции (1)  $Q$  [10]. Предполагались полнота завершения химических превращений и постоянство давления газа в предсупло-вом объеме:

$$T_0 = T_5 + \Delta T, \quad \Delta T = \frac{\xi_{N_2}^0 Q}{\bar{c}_p}$$

$$p_0 = p_5 = \text{const},$$

где  $\bar{c}_p$  — средняя в диапазоне температуры  $[T_5, T_5 + \Delta T]$  теплоемкость смеси;  $T_0$  и  $p_0$  — конечные значения давления и температуры газа в «горячей пробке».

Начальные составы исследованных в данной работе смесей и диапазоны изменения температуры газа в предсупловом объеме приведены в таблице. Нумерация смесей в таблице совпадает с обозначениями экспериментальных кривых на рис. 1—9. Содержание гелия во всех исследованных смесях одинаково и составляет  $\xi_{He}^0 = 0,3$ . Давление в предсупловом объеме во всех описываемых опытах поддерживалось равными  $5,2 \pm 0,5$  атм.

Номер смеси	Исходный состав смеси	$T_0$ , К
1	$0,05N_2O + 0,25CO + 0,4N_2 + 0,3He$	1700—2800
2	$0,1N_2O + 0,3CO + 0,3N_2 + 0,3He$	2100—3200
3	$0,2N_2O + 0,4CO + 0,1N_2 + 0,3He$	3000—3500
4	$0,05N_2O + 0,05CO + 0,6N_2 + 0,3He$	1700—2600
5	$0,05N_2O + 0,65CO + 0,3He$	1600—2700

В пренебрежении образованием молекул  $O_2$  и  $NO$  термодинамически равновесный состав продуктов реакции в смесях 1—5 может быть найден из (1). В первой серии экспериментов со смесями 1—3 начальная концентрация закиси азота  $\xi_{N_2O}^0$  увеличивалась от 0,05 до 0,2. Чтобы сохранить постоянной концентрацию  $CO$  в продуктах реакции ( $\xi_{CO} = 0,2$ ), начальное содержание  $CO$  в ряду смесей 1—3 увеличивалось и составляло  $\xi_{CO}^0 = 0,25; 0,3; 0,4$ . Для смесей начального состава 1—3 концентрация  $CO_2$  и  $N_2$  в продуктах реакции составляла соответственно 0,05; 0,1; 0,2 и 0,45; 0,4; 0,3. Температуры  $\Delta T$  в предсупловом объеме за счет энерговыделения при химических превращениях увеличивались в ряду смесей 1—3, составляя соответственно  $\sim 540, 1030$  и  $1900$  К.

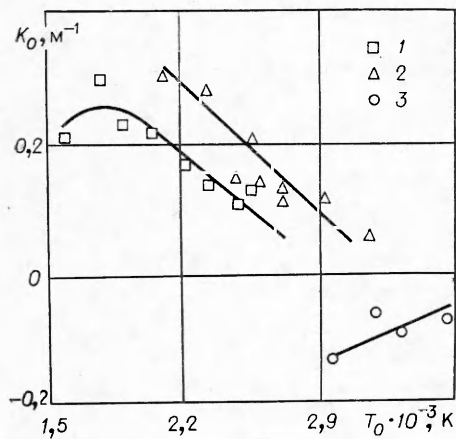


Рис. 1.

При  $T_0 = 3000$  К поглощение составляет примерно  $-0,15 \text{ м}^{-1}$ .

Полученные в данной работе значения коэффициента усиления в продуктах реакций, происходящих в смеси 2, хорошо согласуются со значениями  $K_0$ , полученными при исследовании  $\text{CO}_2$ -лазера на продуктах реакции состава  $\text{N}_2\text{O} + \text{N}_2(\text{CO}) + \text{He}$  ( $\xi_{\text{N}_2\text{O}}^0 = 0,1$ ) [14].

Зависимость относительной инверсной населенности  $\Delta N$  от температуры перед соплом для смесей 1—3 приведена на рис. 2. Существенно, что наибольшие значения  $\Delta N$  наблюдаются для смеси 1 ( $\xi_{\text{N}_2\text{O}}^0 = 0,05$ ). Максимальная величина  $\Delta N = 3,5\%$  получена при  $T_0 \approx 1800$  К. В продуктах реакции состава 2 величина  $\Delta N$  меняется от  $\sim 2,2\%$  до  $\sim 0,8\%$  при изменении температуры от 2200 до 3000 К. Следовательно, более высокие значения коэффициента усиления для смеси 2 по сравнению со смесью 1 обусловлены более высокой концентрацией молекул  $\text{CO}_2$  в продуктах реакции состава 2. Для смеси 3 ( $\xi_{\text{N}_2\text{O}}^0 = 0,2$ ) значения  $\Delta N$  отрицательны и составляют примерно  $-0,75\%$ .

Колебательные температуры асимметричной моды  $\text{CO}_2$  для смесей 1—3 приведены на рис. 3. Штриховыми линиями показана температура в критическом сечении сопла  $T_*$  для этих составов. Для смесей 1, 2 характерно возрастание колебательной температуры  $T_3$  при увеличении  $T_0$ . В продуктах реакции в составе 1 ( $\xi_{\text{N}_2\text{O}}^0 = 0,05$ ) величина  $T_3$  в области  $T_0 = 1500—1700$  К незначительно отличается от температуры в критическом сечении сопла. С ростом  $T_0$  величина  $T_0 - T_3$  для смесей 1, 2 быстро увеличивается. Значения  $T_3$  для состава 1 меняются от  $\sim 1300$  до  $\sim 1470$  К при изменении  $T_0$  от 1600 до 2700 К. Измеренные значения  $T_3$  в продуктах реакции в составе 2 ( $\xi_{\text{N}_2\text{O}}^0 = 0,1$ ) лежат приблизительно на 100 К ниже, чем для смеси 1. Наименьшие значения  $T_3$  получены для смеси 3 ( $\xi_{\text{N}_2\text{O}}^0 = 0,2$ ) и составляют  $\sim 1200$  К при  $T_0 = 2900 \div 3600$  К.

Колебательная температура  $T_2$  объединенной моды  $\text{CO}_2$  (нижнего

На рис. 1 приведены зависимости коэффициента усиления  $K_0$  в первом сечении потока ( $L = 140$  мм) для смесей 1—3 от температуры в предсопловом объеме. Наибольшее усиление наблюдается в продуктах реакции, происходящих в составе 2 ( $\xi_{\text{N}_2\text{O}}^0 = 0,1$ ). Максимальное измеренное  $K_0 = 0,3 \text{ м}^{-1}$  при  $T_0 \approx 2100$  К. Для смеси 1 с  $\xi_{\text{N}_2\text{O}}^0 = 0,05$  коэффициент усиления несколько меньше, максимум  $K_0$  наблюдается при  $T_0 = 1700—1800$  К и составляет  $\sim 0,27 \text{ м}^{-1}$ . Значительное энерговыделение не позволило в условиях данной работы провести исследования смеси 3 в области  $T_0 \leq 2900$  К. Измеренные в диапазоне  $T_0 = 2900—3600$  К значения  $K_0$  отрицательны.

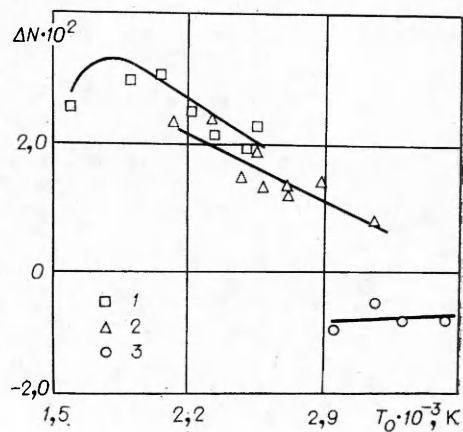


Рис. 2.

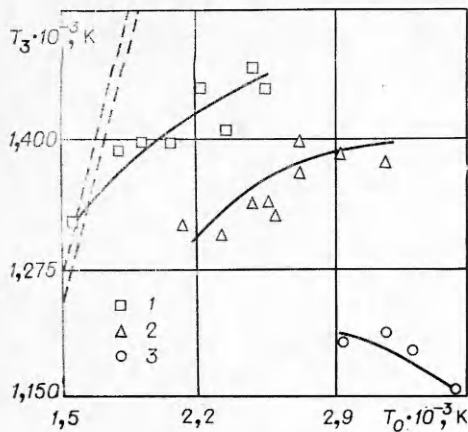


Рис. 3.

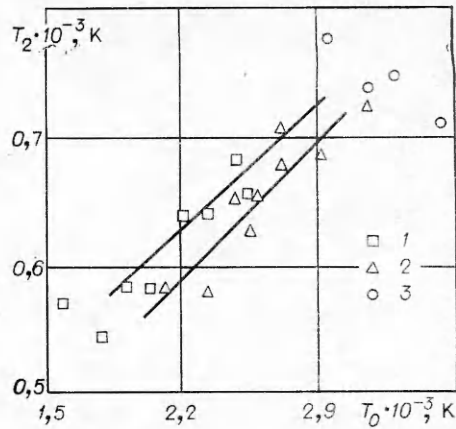


Рис. 4.

лазерного уровня) монотонно возрастает при увеличении  $T_0$  у составов 1, 2 (рис. 4) и изменяется в диапазоне 550—700 К при увеличении  $T_0$  от 1600 до 2900 К. Для смеси 3 с  $\xi_{N_2O}^0 = 0,2$   $T_2 = 700 \div 780$  К при  $T_0 = 2900 \div 3600$  К.

Полученные экспериментальные значения  $T_2$  для составов 1—3 значительно превышают газовую температуру в рабочем сечении потока во всем исследованном диапазоне величин  $T_0$ . Степень отклонения от равновесия объединенной моды углекислого газа наглядно иллюстрируется рис. 5, где для смесей 1—3 представлено отношение колебательной  $T_2$  и поступательной температуры  $T$  в рабочем сечении потока в зависимости от величины  $T_0$ . Видно, что  $T_2/T$  уменьшается от 0,3 до 1,5 при увеличении температуры перед соплом от 1600 до 3600 К.

Таким образом, измерения колебательных температур  $T_3$  и  $T_2$  показали, что наиболее высокие значения относительной инверсной населенности в смеси 1 связаны с хорошими условиями «замораживания» колебательной энергии верхнего лазерного уровня (см. рис. 3), компенсирующими сравнительно высокую заселенность объединенной моды углекислого газа. В продуктах реакций, происходящих в составах 2 и 3 с увеличенным  $\xi_{N_2O}^0$  до 0,1 и 0,2, наблюдаются существенно более низкие значения температуры асимметричной моды молекулы  $CO_2$ . Это

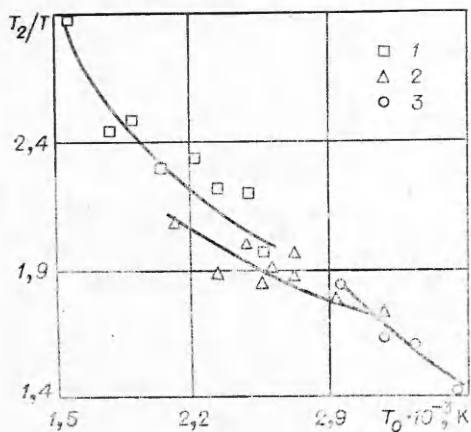


Рис. 5.

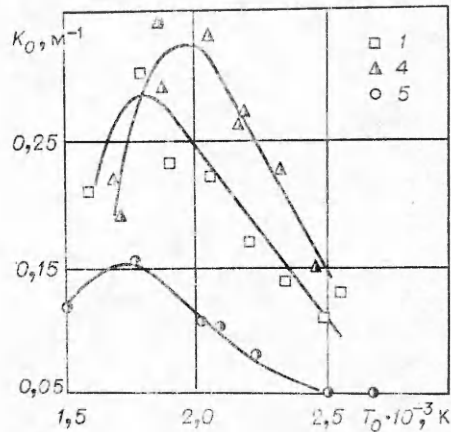
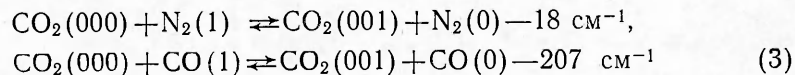


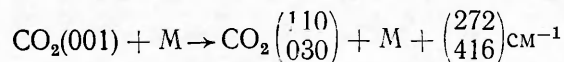
Рис. 6.

связано с более эффективным протеканием процессов релаксации колебательной энергии верхнего лазерного уровня при повышении концентрации углекислого газа в продуктах химических превращений  $\text{CO} + \text{N}_2\text{O}$ .

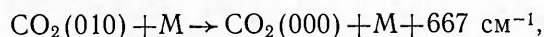
Релаксация верхнего лазерного уровня  $\text{CO}_2$  осуществляется в основном посредством колебательно-колебательного обмена между молекулами  $\text{CO}_2$  ( $\nu_3$ ),  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2$



с последующим внутримолекулярным  $V-V'$ -обменом в углекислом газе



и колебательно-поступательной релаксации объединенной моды



где  $\text{M}$  — любая молекула. Температура нижнего лазерного уровня при этом изменяется незначительно. Эти факторы приводят к снижению величины инверсной населенности в продуктах реакций, происходящих в смеси 2 (см. рис. 4). В потоке продуктов реакции состава 3 различие между колебательными температурами  $T_3$  и  $T_2$  оказывается недостаточным для образования инверсной населенности лазерных уровней молекул  $\text{CO}_2$ .

Во второй серии экспериментов (составы 1, 4 и 5) в исходной смеси при неизменной концентрации закиси азота, равной 0,05, проводилось увеличение концентрации окиси углерода за счет инертного компонента — азота. Концентрация окиси углерода увеличивается в ряду смесей 4, 1 и 5, составляя в продуктах их химических превращений  $\xi_{\text{CO}} = 0; 0,2; 0,6$ . Концентрация азота в продуктах химических превращений этих смесей равна 0,65; 0,45; 0,05. Повышение температуры в предсопловом объеме для смесей 1, 4 и 5 приблизительно одинаково и составляет 540 К.

Температурные зависимости коэффициента усиления в первом сечении потока  $K_0(T_0)$  для смесей 1, 4 и 5 приведены на рис. 6. Снижение коэффициента усиления в области низких температур определяется резким уменьшением содержания в расширяющемся потоке молекул углекислого газа вследствие значительной неполноты химических превращений в предсопловом объеме. В инертных смесях  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He} (\text{H}_2\text{O})$  снижение коэффициента усиления при уменьшении  $T_0$  отмечается в области  $T_0 \approx 1400 \div 1500 \text{ К}$  и связано с уменьшением равновесного запаса колебательной энергии молекул  $\text{CO}_2(\nu_3)$  и  $\text{N}_2$  в предсопловом объеме.

Наибольшие значения коэффициента усиления реализуются при расширении продуктов реакции, происходящем в смеси 4, молекулы  $\text{CO}$  в которой полностью расходуются в результате химических превращений (см. рис. 6). Максимальное значение коэффициента усиления равно  $\sim 0,33 \text{ м}^{-1}$  и достигается в области  $T_0 = 1800 \div 2100 \text{ К}$ . Введение в продукты реакции  $\text{CO} + \text{N}_2\text{O}$  окиси углерода за счет азота в количестве  $\xi_{\text{CO}} = 0,2$  (смесь 1) приводит к уменьшению коэффициента усиления на 20—30% в области  $T_0 > 1600 \text{ К}$ . Максимальное значение  $K_0$  составляет для состава 1  $0,28 \div 0,3 \text{ м}^{-1}$  и достигается при  $T_0 \approx 1700 \text{ К}$  (см. рис. 6). В продуктах реакции, происходящей в смеси 5, содержание окиси углерода составляет  $\xi_{\text{CO}} = 0,6$ , а концентрация азота не превышает 0,05. Это приводит к существенному, более чем двукратному,



уменьшению коэффициента усиления по сравнению со смесью 4. Максимальная величина коэффициента усиления в продуктах реакции смеси 5 составляет  $\sim 0,15 \text{ м}^{-1}$  и достигается при  $T_0 = 1700 \div 1800 \text{ К}$ .

Наблюдаемое уменьшение коэффициента усиления в продуктах реакции  $\text{CO} + \text{N}_2\text{O}$ , разбавленных гелием и азотом, при увеличении концентрации  $\text{CO}$  и уменьшении количества  $\text{N}_2$  качественно хорошо согласуется с результатами теоретических и экспериментальных исследований механизма образования инверсной заселенности в химически инертных смесях  $\text{CO}_2 + \text{CO} + \text{N}_2 + \text{He} (\text{H}_2\text{O})$  [4, 12, 15—17].

Характер температурных зависимостей относительной инверсной населенности аналогичен соответствующим зависимостям для коэффициента усиления  $K_0(T_0)$ . Максимальные значения  $\Delta N$  уменьшались с ростом концентрации окиси углерода, составляя 4,4; 3,5; 1,8% соответственно для смесей 4, 1 и 5. Максимальные значения относительной инверсной населенности в смесях 4, 1, 5 достигались при таких же значениях  $T_0$ , что и максимальные значения  $K_0$ .

Результаты измерений колебательной температуры асимметричной моды углекислого газа  $T_3$  для продуктов реакции смесей 1, 4 и 5 представлены на рис. 7; штриховой линией показана температура в критическом сечении сопла  $T_*$ . Для исследованных составов зависимости  $T_3$  от  $T_0$  являются монотонно возрастающими функциями. При  $T_0 = 1500 \div 1700 \text{ К}$  значения  $T_3$  близки к температуре в критическом сечении сопла. При дальнейшем увеличении  $T_0$  разность  $T_*$  и  $T_3$  быстро возрастает. Для смеси 4 ( $\xi_{\text{CO}}^0 = 0,05$ ), в которой молекулы окиси углерода полностью расходуются на образование  $\text{CO}_2$  в ходе химических реакций, колебательная температура  $T_3$  значительно (на 200—250 К) превышает величину  $T_3$  для смесей 1, 5 ( $\xi_{\text{CO}}^0 = 0,25; 0,65$ ). Измеренные значения  $T_3$  в продуктах реакции, происходящей в смесях 4 и 5, практически одинаковы во всем исследованном диапазоне температур.

Измерения колебательной температуры  $T_2$  показали значительную населенность объединенной моды молекулы  $\text{CO}_2$  в продуктах реакции в исследованных смесях при  $T_0 = 1500 \text{—} 3000 \text{ К}$  (рис. 8). Для всех смесей величина  $T_2$  более чем вдвое превышает поступательную температуру газа  $T$  в рабочем сечении. Удвоенное значение температуры  $T$  показано на рис. 8 штриховой линией. Величины  $T_2$  для составов 4 и 1 практически одинаковы и увеличиваются от  $\sim 550$  до  $\sim 700 \text{ К}$  при изменении  $T_0$  от 1500 до 2500 К. Полная замена азота в исходной смеси на окись углерода, не меняя возрастающего характера зависимостей  $T_2(T_0)$ , приводит к увеличению значений  $T_2$  для смеси 5 на 50—80 К по

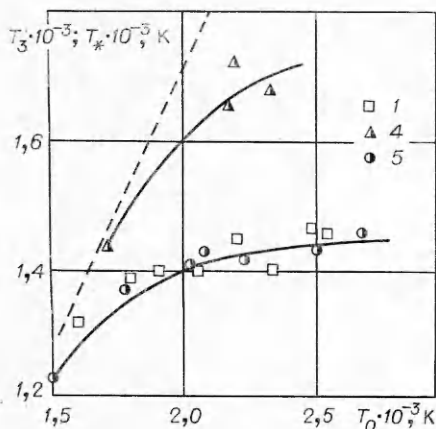


Рис. 7.

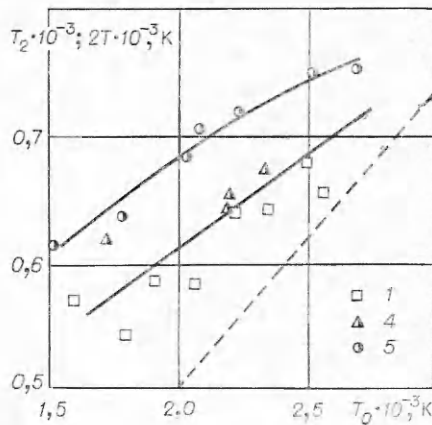


Рис. 8.

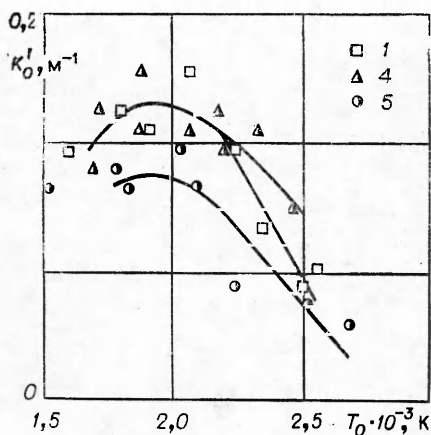


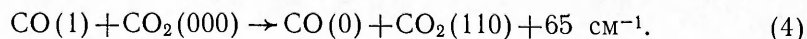
Рис. 9.

коэффициента усиления при переходе от первого сечения потока ко второму в смеси 5 невелико (см. рис. 6, 9).

Из приведенных на рис. 7 и 8 результатов измерения колебательных температур  $T_3$  и  $T_2$  можно сделать вывод, что высокие значения коэффициента усиления, полученные для смеси 4, не содержащей в продуктах химических превращений молекул CO, связаны с хорошими условиями «замораживания» колебательной энергии верхнего лазерного уровня при относительно высокой населенности нижнего лазерного уровня. Сравнение населенностей (температур) верхнего и нижнего лазерных уровней в продуктах реакции в смесях 1 и 4 показывает, что наблюдаемые более низкие коэффициенты усиления для состава 1 по сравнению со смесью 4 обусловлены более низкой населенностью верхнего лазерного уровня при одинаковой для обеих смесей населенности нижнего лазерного уровня. При дальнейшем увеличении концентрации окиси углерода в продуктах реакции до 0,6 (смесь 5) значения  $K_0$  уменьшаются во всем исследованном диапазоне температур. Это уменьшение обусловлено в основном повышением населенности объединенной моды углекислого газа (см. рис. 6, 8).

Снижение колебательной температуры  $T_3$  при введении в состав смеси окиси углерода может быть обусловлено протеканием процесса нерезонансного колебательного  $V-V'$ -обмена (3) между асимметричной модой углекислого газа и окисью углерода. В результате этого взаимодействия происходит увеличение колебательной энергии окиси углерода за счет энергии асимметричной моды углекислого газа [18].

Наблюдается качественное согласие результатов измерения колебательной температуры  $T_3$  для реагирующих смесей 1, 4 и 5 с результатами расчета изменения величины  $T_3$  при последовательной замене азота на окись углерода в химически инертных составах  $0,1\text{CO}_2 + 0,4(\text{N}_2 + \text{CO}) + 0,5\text{He}$  [4]. В [4] установлено, что полная замена  $\text{N}_2$  на CO приводит к уменьшению колебательной температуры  $T_3$  примерно на 200K. Увеличение колебательной температуры  $T_2$  в продуктах реакций в смеси 5 (рис. 8, 5) может быть обусловлено появлением дополнительного канала релаксации колебательной энергии молекул  $\text{CO}_2(\nu_3)$ ,  $\text{N}_2$  и CO через объединенную моду углекислого газа



Скорость релаксации колебательной энергии через канал (4) при комнатной температуре сравнима со скоростью дезактивации асимметрич-

сравнению со смесями 1, 4 в диапазоне  $T_0 = 1500-2700\text{K}$ .

Температурные зависимости коэффициента усиления во втором сечении потока ( $L=350\text{ мм}$ ) представлены для смесей 1, 4, 5 на рис. 9. Для смесей 1 и 4 величины  $K'_0$  и  $T_0 \approx 2200\text{K}$  приблизительно одинаковы и более чем в два раза ниже значений коэффициента усиления, полученных для этих смесей в первом сечении потока. Максимальные значения  $K'_0$  не превышают для смесей 1 и 4  $\sim 0,14 \text{ м}^{-1}$  и реализуются при  $T_0 = 1900-2200\text{K}$ . Для состава 5, в продуктах химических превращений которого концентрация окиси углерода достигает 0,6  $K'_0$  ниже, чем для смесей 1, 4. Уменьшение



ной моды  $\text{CO}_2$  через канал (3) при столкновениях с окисью углерода [19].

Численный расчет колебательной температуры  $T_2$  в пренебрежении релаксационным каналом (4) предсказывает уменьшение величины  $T_2$  при введении в состав  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$  окиси углерода [16]. Учет канала (4) в схеме энергообмена в смеси  $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{CO} + \text{He} + \text{He}$  с использованием оценки константы скорости этого процесса, согласно [20], приводит к возрастающей зависимости колебательной температуры нижнего лазерного уровня  $T_2$  от содержания окиси углерода [4]. Это качественно хорошо согласуется с результатами измерений величины  $T_2$  в данной работе.

*Поступила в редакцию  
18/VII 1978*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. А. Бохон, Н. И. Давлетчин и др.—В сб.: Краткие сообщ. по физике. Вып. 11 ФИАН, 1972.
2. Н. Н. Кудрявцев, С. С. Новиков, И. Б. Светличный. ПМТФ, 1974, 5.
3. Ю. И. Гринь, В. М. Поляков, В. Г. Тестов. ЖЭТФ, 18, 4.
4. В. Н. Макаров, С. А. Лосев. ФГВ, 1975, 11, 5.
5. H. Gueguen, F. Yzambart a. o. Chem. Phys. Lett, 1975, 35, 2.
6. Н. Н. Кудрявцев. Канд. дис., МФТИ, 1977.
7. А. А. Борисов. Кинетика и катализ, 1968, 9, 482.
8. Р. И. Солоухин. Докл. АН СССР. 1970, 194, 1.
9. D. Milks, R. A. Matula. 14-th International Symposium on Combustion, Pittsburg, 1972.
10. M. C. Lin, S. H. Bauer. J. Chem. Phys., 1969, 50, 8.
11. А. Б. Британ, С. А. Лосев, О. П. Шаталов. Квант. электроника. 1974, 1, 12.
12. W. A. Rosser, E. T. Gerry. J. Chem. Phys., 1971, 54, 4131.
13. Е. В. Ступоченко, С. А. Лосев, А. И. Осипов. Релаксационные процессы в ударных волнах. М., «Наука», 1965.
14. В. Г. Тестов, Ю. И. Гринь и др. ЖЭТФ, 1976, 71, 1.
15. В. М. Шмелев, Н. Я. Василек, А. Д. Марголин. Квант. электроника, 1974, 1, 8.
16. А. С. Дьяков, А. К. Пискунов, Н. Н. Черкасов. Кван. электроника, 1975, 2, 7.
17. R. Jennaut, R. Vergas, S. Hadley. AIAA Paper, 1974, 178.
18. Б. Ф. Горднеев, А. И. Осипов, Л. А. Шелепин. ЖЭТФ, 1971, 60, 102.
19. J. Taine. Chem. Phys. Lett., 1976, 41, 2.
20. D. J. Seery. J. Chem. Phys., 1972, 56, 1.

#### МЕТАНИЕ ПЛАСТИН ПРОДУКТАМИ ВЗРЫВА СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

*А. В. Уткин, Ю. А. Гордополов, А. Н. Михайлов*

*(Черноголовка)*

В настоящее время широкое развитие получил процесс обработки металлов взрывом. При этом часто используется метание пластин продуктами взрыва (ПВ) скользящей детонационной волны. На практике важно знать скорость пластины в зависимости от характеристик взрывчатого вещества (ВВ) и условий постановки эксперимента. Решить эту задачу в общем случае не удастся, поэтому пользуются приближенными моделями.