

**О ВЛИЯНИИ ПРИМЕСЕЙ
НА КОЭФФИЦИЕНТ ОПТИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ
ПРИ ТЕЧЕНИИ РЕЛАКСИРУЮЩЕГО ГАЗА
В СВЕРХЗВУКОВОМ СОПЛЕ**

В. Н. Макаров, С. А. Лосев

(Москва)

В ряде работ проведено теоретическое и экспериментальное исследование оптического усиления в релаксирующей смеси углекислого газа с азотом, гелием и парами воды. Во многих случаях, однако, релаксирующая смесь может содержать и другие компоненты, например, молекулы CO, O₂, которые образуются при диссоциации CO₂, а также другие примеси. В данном сообщении приводятся результаты теоретического изучения влияния добавок CO, O₂, H₂, H₂O на коэффициент оптического усиления смеси CO₂—N₂—He в предположении отсутствия химических превращений.

Рассматривалось одномерное стационарное течение в плоском сверхзвуковом сопле клиновидной формы с полууглом раствора 15° и высотой критического сечения 2 мм аналогично [1]. Там же и в [2] указаны основные допущения относительно схемы релаксационных процессов в рассматриваемых смесях. В дополнение к [1, 2] проведен учет колебательной релаксации и энергообмена между CO₂, N₂ и молекулой CO; предполагалось, что молекулы H₂O и H₂ находятся в колебательном равновесии с поступательными степенями свободы молекул, колебательная температура молекулы O₂ равна колебательной температуре азота.

Система релаксационных уравнений для колебательной энергии $e_i = [\exp(\theta_i/T_i) - 1]^{-1}$ — среднего числа колебательных квантов i -го типа в расчете на одну молекулу (θ_i — характеристическая колебательная температура, T_i — колебательная температура) — записывается в виде [1, 2]:

$$\frac{de_2}{dt} = \nu(\varphi_{23} + \psi_2 + \xi_5\varphi_{25}); \quad \frac{de_3}{dt} = -\varphi_{23} - \xi_4\varphi_{34} - \xi_5\varphi_{35};$$

$$\frac{de_4}{dt} = \xi_3\varphi_{34} + \xi_5\varphi_{45} + \psi_4; \quad \frac{de_5}{dt} = \xi_3\varphi_{35} - \xi_2\varphi_{25} - \xi_4\varphi_{45} + \psi_5;$$

где $\varphi_{ij} = pQ_{ij} \left[e_j(e_i + 1)^3 - e_i^3(e_j + 1) e^{-\frac{\theta_j - 3\theta_i}{T}} \right]$ для $(i, j) = 2, 3; 2, 5;$

$$\varphi_{ij} = pQ_{ij} \left[e_i(e_j + 1) e^{\frac{\theta_i - \theta_j}{T}} - e_j(e_i + 1) \right] \text{ для } (i, j) = 3, 4; 3, 5;$$

$$\psi_i = \frac{p}{\tau_i} (\bar{e}_i - e_i); \quad e_1 = \frac{e_2^2}{1 + 2e_2}; \quad \nu = \frac{(1 + 2e_2)^2}{6e_2^2 + 6e_2 + 1};$$

$\bar{e}_i = e_i(T_i = T)$; p — давление газа, ξ_i — молярная доля компонент. Индексы соответствуют: 1—3 — тип колебаний CO₂, 4 — молекула N₂, 5 — молекула CO, 6 — молекула H₂O, 7 — молекула H₂ или O₂, 8 — атом гелия ($\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \xi_{CO_2}$). Величины τ_2, τ_4, τ_5 — значения времени колебательно-поступательного обмена для CO₂, N₂ и CO соответственно (с·атм); Q_{ij} — значения вероятностей колебательного обмена для соответствующих переходов (с⁻¹·атм⁻¹):

$$\frac{1}{\tau_i} = \sum_{j=3}^8 \frac{\xi_j}{\tau_i^{(j)}}, \quad i = 2, 4, 5; \quad Q_{23} = \sum_{j=3}^8 \xi_j Q_{23}^{(j)}.$$

Принятые в расчетах зависимости $\tau_i^{(j)}$ и $Q_{23}^{(j)}$ от температуры без учета добавок приведены в [1]. Для $\tau_5^{(j)}$ приняты значения: для столкновений CO—CO₂ $\lg \tau_5 = 83T^{-1/3} - 10,52$, согласно [3, 4], для CO—N₂, CO—CO, CO—O₂ $\lg \tau_5 = 75,8T^{-1/3} - 10,16$ [4], для CO—He $\lg \tau_5 = 36,5T^{-1/3} - 8,14$ [5] и для CO—H₂O $\tau_5 = 1,7 \cdot 10^{-7}$ [6]. Для вероятностей колебательного обмена с молекулой CO приняты величины: $Q_{25} = 4 \cdot 10^4$ по оценке [7], $Q_{35} = 2,45 \cdot 10^8 / \sqrt{T}$ для $T < 1500$ К и $\lg Q_{35} = 11,95 - 58,8T^{-1/3}$ для $T \geq 1500$ К [7, 8]; $Q_{45} = 5 \cdot 10^5$ для $T < 1955$ К и $\lg Q_{45} = 13,187 - 93,6T^{-1/3}$ ($T \geq 1955$ К) [9, 10]. Использованные в расчетах величины τ_2 , τ_4 и Q_{23} для столкновений с молекулами H₂ и CO указаны в таблице. Значения τ_2^{CO} и τ_4^{CO} приняты равными величинам, полученным при столкновениях с молекулами азота. Эффективность молекул кислорода также предполагается равной эффективности азота.

Величина коэффициента усиления для излучения с длиной волны 10,6 мкм вычислялась так же, как и в [1, 2]. Результаты расчетов представлены на рисунках. Во всех случаях исследовалось влияние добавок

i	$\lg \tau_2^{(j)}$	$\lg \tau_4^{(j)}$	$\lg Q_{23}^{(j)}$
H ₂	$-15,5T^{-1/3} - 5,55$ [11]	$56,2T^{-1/3} - 10,254$ [12]	$\left\{ \begin{array}{l} 6,67 - 6,10^{-4}T \quad T \geq 428^\circ \\ 6,41 \quad T < 428^\circ \end{array} \right\}$ [13]
CO	$15,55T^{-1/3} - 8,06$	$95,5T^{-1/3} - 10,76$	$\left\{ \begin{array}{l} 7,18 - 14,57T^{-1/3} \quad T \geq 407^\circ \\ 5,21 \quad T < 407^\circ \end{array} \right\}$ [8]

к смеси 10% CO₂+40% N₂+50% He. Содержание углекислого газа оставалось неизменным, а менялось содержание либо азота, либо гелия. Для всех вариантов начальная температура перед входом в сопло предполагалась равной 1600 К, начальное давление — 10 атм. На рис. 1—4 приведены распределения значений колебательных и поступательной температур и коэффициента оптического усиления вдоль сопла: для примесей CO (рис. 1), O₂ (рис. 2) и H₂O (рис. 3), добавляемых к азоту, и для H₂O и H₂ (рис. 4), добавляемых к гелию. Для сравнения на рис. 1

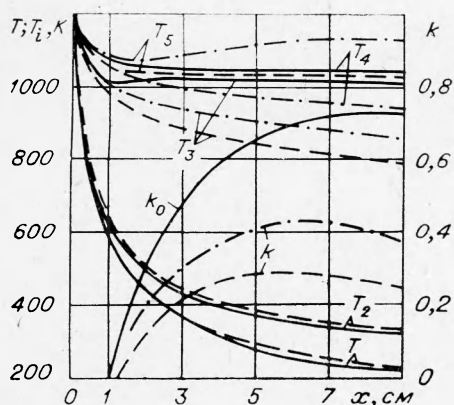


Рис. 1. Распределение значений колебательных и поступательной температур T_i и коэффициента оптического усиления k (1/%·С) вдоль сопла.

— 10% CO₂+40% N₂+50% He, — — — — —
 10% CO₂+10% CO+40% N₂+50% He,
 - - - - - 10% CO₂+20% CO+20% N₂+50% He.
 Значения T_2 и T в последнем варианте находятся между значениями соответствующих температур для указанных выше двух составов.

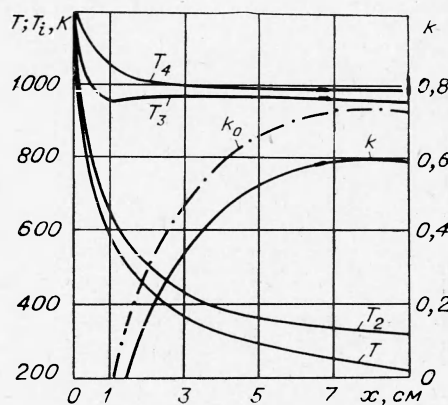


Рис. 2. Распределение T , T_i и k вдоль сопла для состава 10% CO₂+20% O₂+20% N₂+50% He в предположении, что $T_{O_2} = T_{N_2}$.

— — — — — распределение значений коэффициента оптического усиления k смеси 10% CO₂+40% N₂+50% He.

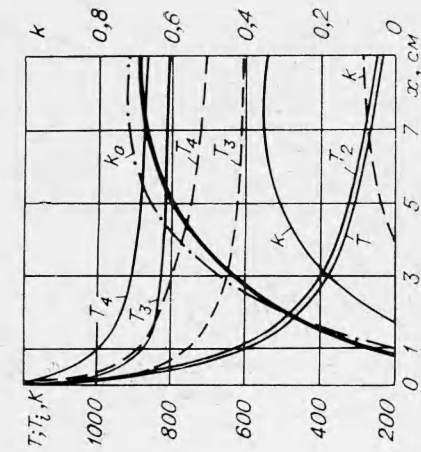


Рис. 3. Распределение T , T_i и k вдоль сопла для составов:

— 10% $\text{CO}_2 + 35\% \text{N}_2 + 5\% \text{H}_2\text{O} + 50\% \text{He}$;
 — распределение коэффициента оптического усиления для состава 10% $\text{CO}_2 + 38\% \text{N}_2 + 2\% \text{H}_2\text{O} + 50\% \text{He}$; — — — 10% $\text{CO}_2 + 25\% \text{N}_2 + 15\% \text{H}_2\text{O} + 50\% \text{He}$.

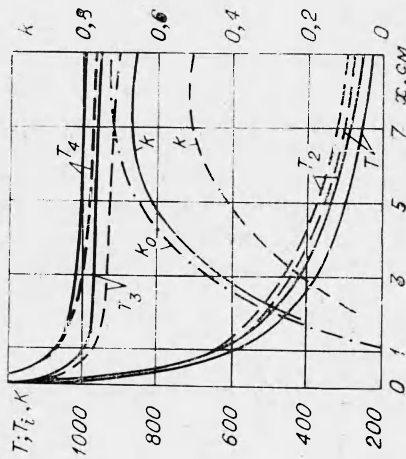


Рис. 4. Распределение T , T_i и k вдоль сопла для составов:

— 10% $\text{CO}_2 + 40\% \text{N}_2 + 2\% \text{H}_2\text{O} + 48\% \text{He}$;
 — — — 10% $\text{CO}_2 + 40\% \text{N}_2 + 15\% \text{H}_2\text{O} + 25\% \text{He}$.

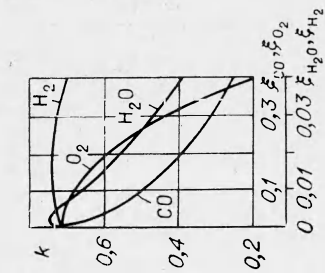


Рис. 5. Значения коэффициента усиления при $x=9$ см в зависимости от концентрации примесей. Кривые, отмеченные знаками CO , H_2O и O_2 , соответствуют замене азота на эти примеси ($\xi_{\text{CO}_2} = 0,1$, $\xi_{\text{He}} = 0,5$). Кривая H_2 соответствует замене гелия на водород. Замена гелия на H_2O практически совпадает с результатами замены азота на воду (при $\xi_{\text{H}_2\text{O}} \leq 0,05$).

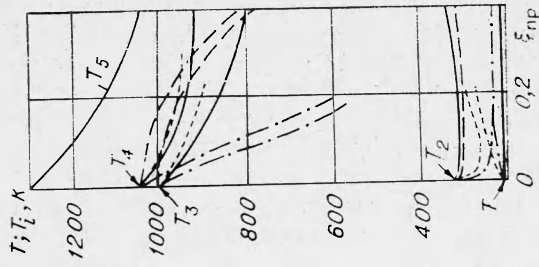


Рис. 6. Изменение T_i и T на выходе из сопла ($x=9$ см) в зависимости от концентраций примесей.

— H_2O , — — — O_2 , — — — CO , — — — H_2 .

приводятся результаты решения задачи для изучаемой смеси без добавок. Результаты решения показывают, что общая картина распределения характеристик вдоль сопла при добавлении примесей меняется незначительно.

На рис. 5 приведены полученные значения коэффициента усиления в сечении сопла с площадью, в 25 раз превышающей критическое сечение в зависимости от концентрации примесей. Из рисунка видно, что полная замена азота на СО и O₂ приводит к уменьшению коэффициента усиления более чем в два раза. Добавка H₂O к азоту вначале увеличивает k (при $\xi_{H_2O} \sim 0,003$), а затем уменьшает. Замена гелия на водород также ведет к небольшому увеличению коэффициента усиления (максимум при $\xi_{H_2} \sim 0,02$).

Колебательная температура молекул окиси углерода T_5 замораживается на более высоком уровне, чем для азота T_4 (рис. 6), тем не менее коэффициент усиления при замене азота на СО уменьшается. Это связано с уменьшением накачки на уровень (001) молекулы СО₂ из-за большей разницы в энергии уровней СО₂—СО, нежели СО₂—N₂. Добавление примесей во всех случаях приводит к уменьшению значений колебательных температур T_3 и T_4 . Особенно заметно влияние водяного пара; при этом T_2 приходит в равновесие с поступательной температурой.

Поступила в редакцию
20/IX 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Лосев, В. Н. Макаров и др. ФГВ, 1973, **9**, 4, 463.
2. С. А. Лосев, В. Н. Макаров. Квант. электроника, 1974, **7**, 1633.
3. W. Hooker, R. Millikan. J. Chem. Phys., 1963, **38**, 214.
4. R. C. Millikan, D. R. White. J. Chem. Phys., 1963, **39**, 3209.
5. H. K. Shin. J. Chem. Phys., 1971, **55**, 11, 5233.
6. C. W. Rosenberg, K. N. Bray, N. H. Pratt. 13-th International Symposium Combustion, 1971.
7. D. J. Seery. J. Chem. Phys., 1972, **56**, 1, 631.
8. W. A. Rosser, R. D. Sharma, E. T. Gerry. J. Chem. Phys., 1971, **54**, 3, 1196.
9. C. W. Rosenberg, K. N. Bray, N. H. Pratt. J. Chem. Phys., 1972, **56**, 7, 3230.
10. P. F. Zittel, C. B. Moore. Appl. Phys. Letters, 1972, **21**, 3, 82.
11. C. Simpson, T. R. D. Chandler. Proc. Roy. Soc. London, 1970, **A317**, 265.
12. D. R. White. J. Chem. Phys., 1967, **46**, 2016.
13. W. A. Rosser, E. T. Gerry. J. Chem. Phys., 1971, **54**, 4131.

УДК 533.6.011.72

О РАСПРОСТРАНЕНИИ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПО НЕОДНОРОДНОЙ КОНДЕНСИРОВАННОЙ СРЕДЕ

А. С. Компанец, В. И. Романова, П. А. Ямпольский

(Москва)

Изучение вещества, находящегося в экстремальном состоянии,— важная задача современной физики твердого тела. В связи с этим приобретает большое значение разработка новых экспериментальных методов получения вещества, сжатого до больших плотностей, и вещества, нагретого до высоких температур. Одним из методов получения высоких давлений, развитых в последние годы, является метод ударных волн. Использование последнего представляет собой эффективный способ по-