

ЛИТЕРАТУРА

1. Дайковский А. Г., Полежаев В. И., Федосеев А. И. Численное моделирование переходного и турбулентного режимов конвекции на основе нестационарных уравнений Навье — Стокса. М., 1978. Препринт № 101 Ин-та пробл. мех. АН СССР.
2. Кирдяшкин А. Г. Структура тепловых гравитационных течений вблизи поверхности теплообмена. Докт. дис. Новосибирск, 1975.
3. Зимин В. Д., Шайдуров В. Г. Неустойчивость конвективного пограничного слоя в замкнутой прямоугольной полости. — Изв. АН СССР. МЖГ, 1975, № 5.
4. Васильев Л. А. Теневые методы. М.: Наука, 1968.
5. Зимин В. Д., Фрик П. Г. Голографическая интерферометрия в условиях сильной рефракции лучей. — Оптика и спектроскопия, 1976, т. 40, № 3.
6. Зимин В. Д. Оптические методы исследования прозрачных неоднородностей. Пермь: Изд-во Пермск. ун-та, 1976.

Пермь

Поступила в редакцию
16.IV.1980

УДК 532.525.539.194

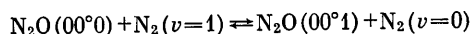
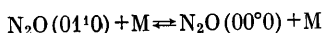
КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ ЗА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ
УДАРНОЙ ВОЛНОЙ В ГАЗОВОЙ СМЕСИ $N_2O - N_2 - He$

НЕТЕСОВ В. В., ТУНИК Ю. В.

Известно, что за цилиндрической ударной волной, распространяющейся по газовой смеси $CO_2 - N_2 - He$, образуется зона инверсной населенности колебательных уровней молекул углекислого газа [1, 2]. Считается, что ударная волна образуется в результате взрывного выделения энергии вдоль прямой линии в покоящемся газе. Частица газа, захваченная ударной волной, нагревается, а затем быстро охлаждается в нестационарной волне разрежения. В результате возникает неравновесное по колебательной энергии состояние. Инверсия населенности и коэффициент оптического усиления газа для этой схемы имеют тот же порядок, что и в стационарных системах, использующих сверхзвуковые сопла.

Исследования, проводимые на сверхзвуковых соплах со смесью $N_2O - N_2 - He$, показывают перспективность использования в некоторых условиях закиси азота вместо углекислого газа. Так, для смесей с N_2O значительный коэффициент усиления достигается при более низких температурах нагрева смеси, чем для смесей с CO_2 [3]. Целью настоящей работы является изучение возможностей применения течения за осесимметричной ударной волной для создания лазерно-активной газовой смеси $N_2O - N_2 - He$.

Для описания релаксационных процессов и процессов колебательного энергообмена в газе используется кинетическая модель, предложенная в [3]:



Здесь $a_1=11^10$, $a_2=12^10$, $a_3=20^0$, $a_4=03^10$, $a_5=04^0$, M — одна из частиц N_2O , N_2 , He . Единственным каналом VT -обмена по этой схеме являются переходы между деформационными колебательными и поступательными степенями свободы. Заполнение верхнего лазерного уровня 00^1 происходит в результате VV' -обмена с возбужденным $N_2(v=1)$, а также нерезонансного VV -обмена. Обмен между симметричными и деформационными колебаниями из-за наличия ферми-резонанса является наиболее быстрым, поэтому полагается, что колебательные температуры этих типов колебаний равны. Другие каналы обмена колебательной энергией из-за малых вероятностей не рассматриваются. Релаксационные уравнения для среднего числа квантов в данном типе колебаний e_i в многокомпонентной смеси гармонических осцилляторов — ротаторов известны и для приведенной выше схемы обмена имеют вид

$$e_1 = \frac{e_2^2}{2e_2 + 1}$$

$$\frac{de_2}{dt} = \lambda_2 \frac{p}{kT} \{-3\varphi_{23}Q_{23}(T) - 4\psi_{23}R_{23}(T) + 2(1-\beta)(e_2^\circ - e_2)Q_2(T)\} \quad (1)$$

$$\frac{de_3}{dt} = \frac{p}{kT} \{-\varphi_{34}\xi_4Q_{34}(T) + \varphi_{23}Q_{23}(T) + \psi_{23}R_{23}(T)\}$$

$$\frac{de_4}{dt} = \frac{p}{kT} \varphi_{34}\xi_3Q_{34}(T)$$

$$\varphi_{23} = \exp(-658/T)e_2^3(1+e_3) - e_3(1+e_2)^3$$

$$\psi_{23} = \exp(190/T)e_2^4(1+e_3) - e_3(1+e_2)^4$$

$$\varphi_{34} = \exp(-154/T)e_3(1+e_4) - e_4(1+e_3)$$

$$e_i = [\exp(\theta_i/T_i) - 1]^{-1}, \quad e_2^\circ = e_2(T)$$

$$\beta = \exp\left(-\frac{848}{T}\right), \quad \lambda_2 = \frac{(1+2e_2)^2}{2(1+6e_2+6e_2^2)}$$

Индексы $i=1, 2, 3$ соответствуют симметричным, деформационным и антисимметричным колебаниям молекулы N_2O , $i=4$ — колебаниям молекулы N_2 , $i=5$ — параметрам, относящимся к гелию. В системе (1) p — давление, T — поступательная температура, T_i — колебательная, а θ_i — характеристические колебательные температуры, относящиеся к i -му типу колебаний, ξ_i — молярная концентрация ($\xi_1 = \xi_2 = \xi_3$), k — постоянная Больцмана. Температурные зависимости коэффициентов колебательного обмена Q_{23} , R_{23} , Q_{34} , Q_2 приводятся в [4]. Уравнения (1) решаются совместно с одномерными нестационарными уравнениями газовой динамики:

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\rho) + \frac{\partial}{\partial r}(r\rho u) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(r\rho u) + \frac{\partial}{\partial r}[r(p + \rho u^2)] = p$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[r\rho\left(h + \frac{u^2}{2} - \frac{p}{\rho}\right)\right] + \frac{\partial}{\partial r}\left[r\rho u\left(h + \frac{u^2}{2}\right)\right] = 0$$

$$p = \rho \frac{R}{\mu} T, \quad h = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{p}{\rho} + \frac{R}{\mu} \sum_{i=1}^4 \xi_i g_i \theta_i e_i$$

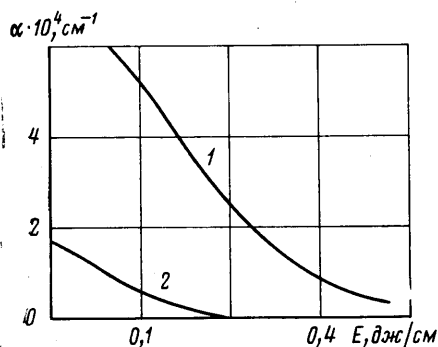
$g_i=1$ при $i \neq 2$, а $g_2=2$.

Здесь r — расстояние от оси взрыва, u — скорость, ρ — плотность, μ — молекулярный вес смеси, R — универсальная газовая постоянная, h — удельная энтальпия. В качестве граничных условий используются соотношения на скачке. В расчетах полагалось, что колебательные температуры T_i за скачком оставались замороженными, т. е. $T_i = T_0$. В начальный момент $t=0$ на единице длины бесконечного цилиндра радиуса r^* мгновенно выделяется энергия E . Температура возмущенной области T^* , а давление $p^* = ERT^*/\pi r^{*2} \mu \varepsilon(T^*)$ ($\varepsilon(T)$ — внутренняя энергия продуктов энерговыделения). Невозмущенный газ представляет собой смесь $N_2O - N_2 - He$ и имеет давление p_0 , температуру T_0 . Решение задачи, приведенное к безразмерному виду, зависит от следующих задаваемых параметров: $\xi_3 + \xi_4$, ξ_4/ξ_3 , T_0 , T^* , $\sqrt{p_0 E}$, r^*/L ($L = \sqrt{E/p_0}$).

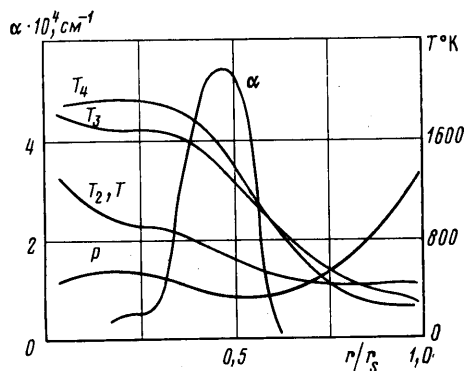
Задача решалась численно по методу С. К. Годунова. В ходе решения определялась инверсия населенности уровней $00^0 1-10^0$ молекулы N_2O и коэффициент усиления. Величина коэффициента усиления рассчитывалась для линии $P(20)$ перехода $00^0 1-10^0$. Во всех расчетах при $t=0$ полагалось, что $T^* = 10^4$ К, $r^* = 0,0125$ Л и $p_0 = 0,2$ атм.

В расчетах с параметрами, оптимальными по коэффициенту усиления для смесей с CO_2 , усиление не наблюдалось. Энергия E , при которой возникает инверсия населенности молекул N_2O , существенно меньше, чем в случае с углекислым газом. Это различие связано с тем, что кванты колебательной энергии молекул закиси азота меньше, чем у молекул углекислого газа.

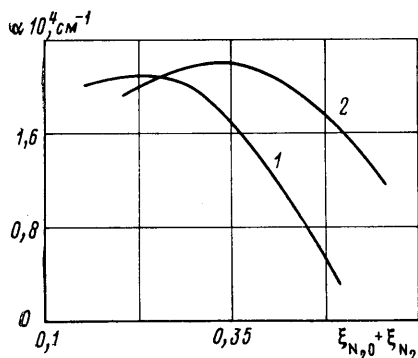
На фиг. 1 приводится зависимость максимального коэффициента усиления α от выделяемой энергии для смеси $N_2O : N_2 : He = 1 : 8 : 11$ при $T_0 = 225$ и 293 К (кривые 1 и 2 соответственно).



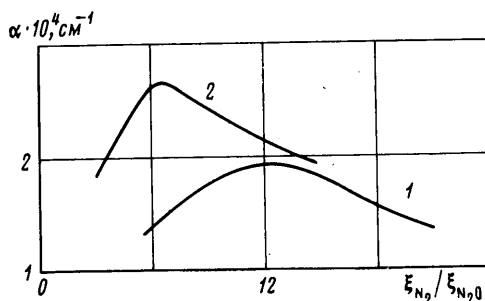
Фиг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3



Фиг. 4

Существование оптимальной величины энергии E при прочих фиксированных параметрах определяется свойствами течения и релаксирующей смеси. При значительном энерговыделении в начальный момент образуется сильная ударная волна, за которой газ имеет высокие температуру и давление, что обуславливает равновесный характер процессов в газе, несмотря на быстрое изменение газодинамических параметров. Со временем интенсивность ударной волны и волны разрежения, следующей за ней, уменьшается, что приводит к выравниванию скоростей изменения газодинамических параметров и процессов колебательного обмена. В результате необходимая инверсия населенности не достигается.

Аналогичная картина с невысокими скоростями изменения газодинамических параметров, а также недостаточный разогрев газа в ударной волне объясняют отсутствие лазерного эффекта при слишком малых энергиях взрыва.

Поскольку коэффициент усиления пропорционален плотности, то его увеличение при температуре покоящегося газа $T_0 = 225$ K (кривая 1) по сравнению со случаем $T_0 = 293$ K (кривая 2) можно объяснить, в частности, увеличением плотности в соответствующих частицах газа.

При расширении подогретой бинарной смеси $N_2O - N_2$ в сверхзвуковом сопле достигается усиление. За цилиндрической ударной волной в бинарных смесях, не содержащих гелия, усиление не получено в широком диапазоне энерговыделения и состава газовой смеси. Указанный результат объясняется другим соотношением механизмов накачки верхних и освобождения нижних лазерных уровней N_2O .

В сопле охлаждается подогретый газ. Азот консервирует колебательную энергию и поддерживает высокую заселенность уровня $N_2O(00^01)$. Уровень $N_2O(10^00)$ дезактивируется через канал $N_2O(10^00) \rightarrow N_2O(02^00) \rightarrow N_2O(01^00) \rightarrow N_2O(00^00)$. За ударной волной вначале происходит заполнение колебательных уровней N_2O , так как вероятность VT-обмена для N_2 мала, а затем уже через канал $N_2O(00^01) \rightarrow N_2(v=1)$ — заполнение колебательных уровней азота. Избыток гелия ускоряет VT-процессы накопления колебательной энергии N_2O за ударной волной. При последующем охлаждении смеси в нестационарной волне разрежения гелий способствует быстрому освобождению нижних лазерных уровней.

Характерное распределение температур, коэффициента усиления и давления в фиксированный момент времени в зависимости от r/r_* изображено на фиг. 2 (r_* — расстояние до фронта ударной волны).

Расчеты с различными составами подтвердили предположение, что для фиксированного набора параметров E , T_0 , $N_2:N_2O$ существует оптимальное содержание гелия в смеси. На фиг. 3 кривая 1 соответствует значениям $E=0,06$ Дж/см, $N_2:N_2O=8:1$, $T_0=293$ К, а кривая 2 — $E=0,02$ Дж/см, $T_0=293$ К, $N_2:N_2O=1,4:1$. Расчетами установлено, что большим значениям энергии взрыва соответствуют большие оптимальные значения концентрации гелия.

Варьирование отношения молярного содержания азота к закиси азота при фиксированной концентрации гелия также приводит к наличию оптимального отношения $N_2:N_2O$. В N_2O-N_2-He -системе уменьшение колебательной энергии, консервируемой в азоте, происходит главным образом через молекулы закиси азота. Поэтому при малом отношении концентрации ξ_{N_2}/ξ_{N_2O} происходит быстрое расходование колебательной энергии, запасенной в молекулах азота, а увеличение отношения концентраций ξ_{N_2}/ξ_{N_2O} при фиксированной сумме $\xi_{N_2}+\xi_{N_2O}$ уменьшает плотность молекул N_2O и, следовательно, значение коэффициента усиления. На фиг. 4 изображены максимальные значения коэффициента усиления для двух серий расчетов с $E=0,02$ Дж/см, $T_0=293$ К, когда $\xi_3+\xi_4=0,44$ (кривая 1) и $\xi_3+\xi_4=0,3$ (кривая 2).

Одновременная оптимизация состава смеси по двум параметрам обнаруживает тенденцию к увеличению коэффициента усиления при увеличении концентрации гелия в смеси и уменьшении отношения концентраций азота к закиси азота. Ниже приведены максимальные значения коэффициента усиления при различных параметрах состава смеси.

$\xi_{N_2O}+\xi_{N_2}$	ξ_{N_2}/ξ_{N_2O}	$\alpha_{\max} \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$	$\xi_{N_2O}+\xi_{N_2}$	ξ_{N_2}/ξ_{N_2O}	$\alpha_{\max} \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$
0,52	11,4	1,43	0,3	10	2,29
0,48	11,4	1,75	0,3	8	2,45
0,44	11,4	1,95	0,3	6	2,686
0,44	15,5	1,74	0,18	4	3,2
0,44	7,4	1,64	0,15	4	3,54
0,4	11,4	2,1	0,12	2	4,6

$E = 0,02$ Дж/см, $T_0 = 293$ К, $r^*/L = 0,0125$, $p_0 = 0,2$ атм.

В расчетах, проведенных для бинарной смеси, не содержащей азота, получены максимальные значения $0,063 \text{ м}^{-1}$ ($E=0,02$ Дж/см, $T_0=293$ К, $N_2O:He=1:24$).

Величина запасенной колебательной энергии в области усиления в момент, когда коэффициент усиления достигает максимального значения ($M_*=1,76$, $E=0,02$ Дж/см, $T_0=293$ К, $\xi_3+\xi_4=0,04$), составляет 1% от энергии взрыва.

Таким образом, в нестационарной волне разрежения за цилиндрической ударной волной, движущейся по невозмущенной газовой смеси N_2O-N_2-He и N_2O-He , получен положительный коэффициент усиления до $6,3 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}$ при комнатной температуре покоящейся смеси. Максимальный коэффициент усиления наблюдается в бинарной смеси, не содержащей азота, с высокой концентрацией гелия. Заметное усиление получается при значениях энергии, меньших 0,1 Дж/см.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee J. H. S., Bui T. D., Knystautas R. Population inversion in blast waves.— *Acta Astronautica*, 1974, v. 1, № 7/8, p. 1085.
2. Левин В. А., Туник Ю. В. Коэффициент оптического усиления за осесимметричной ударной волной.— *Физика горения и взрыва*, 1977, т. 13, № 3, с. 447.
3. Бирюков А. С., Волков А. Ю., Демин А. И., Кудрявцев Е. М., Кулагин Ю. А., Соболев Н. Н., Шелепин Л. А. Исследование газодинамического N_2O -лазера.— *ЖЭТФ*, 1975, т. 68, вып. 5, с. 1664–1678.
4. Бирюков А. С., Волков А. Ю., Демин А. И., Кудрявцев Е. М., Кулагин Ю. А., Соболев Н. Н., Шелепин Л. А. Экспериментальное и теоретическое исследование газодинамического N_2O -лазера. М., 1974. 47 с. (Препринт ФИАН № 140).

Москва

Поступила в редакцию
26.V.1980