

ИНВЕРСНАЯ ЗАСЕЛЕННОСТЬ В ВЕРХНЕЙ АТМОСФЕРЕ
ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А. С. Биржов, Ю. А. Кулагин, М. Н. Марков, Л. А. Шелепин

УДК 525.23

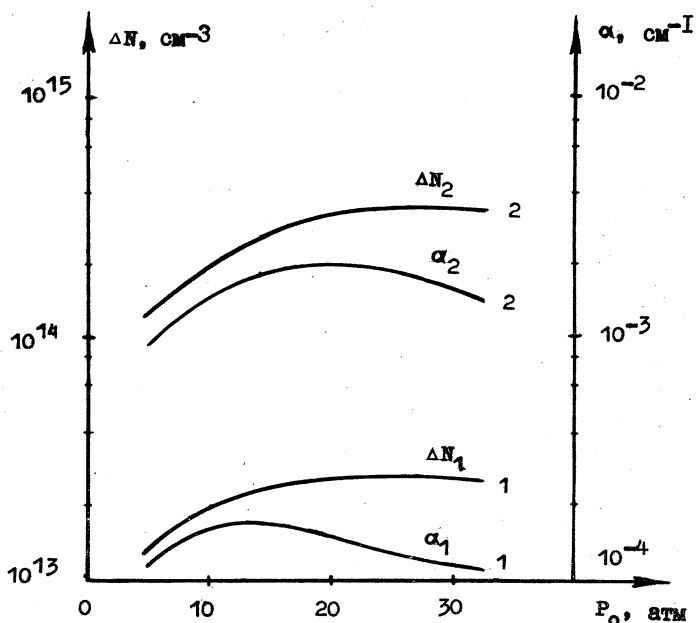
Рассмотрены основные факторы, приводящие к инверсной заселенности в верхней атмосфере при выбросах газа и пролете тел. Проанализированы возможности получения эффективного усиления.

В стационарных условиях верхней атмосферы, согласно /1/, существует инверсная заселенность на колебательно-вращательных переходах молекул OH , NO , NO^+ . Из-за малой плотности вещества коэффициент усиления незначителен (10^{-2} на всю толщину атмосферы).

Однако при выбросах газа и взрывах в верхней атмосфере, а также при полетах искусственных спутников и ракет может возникать инверсия, существенно превышающая стационарную. Хотя подобная инверсная заселенность носит локальный, а не планетарный характер, она может играть принципиальную роль в вопросах исследования кинетики процессов и диагностики верхней атмосферы, управления движущимися объектами и связи с ними. Здесь следует учитывать четыре специфических фактора, благоприятствующих созданию инверсии: вакуум, наличие свободных атомов и радикалов, заметные электронные плотности, ударные волны, образующиеся при пролетах тел.

Оценим возможности, вытекающие из перечисленных факторов. Благодаря вакууму инверсия может создаваться газодинамически. Рассмотрим ее на примере свободного разлета сферического и цилиндрического газовых ступков смеси $\text{N}_2\text{O}-\text{N}_2$. С этой целью численно решалась система релаксационных уравнений /2/ совместно с уравнением для газовой температуры. Вычисления проводились для смеси $\text{N}_2\text{O}-\text{N}_2$ (1:4) при различных начальных температурах T_0 , давлениях P_0 и радиусах R_0 . Находились радиальные распределения полной колебательной инверсии ΔN и показателя усиления α ,

который рассчитывался аналогично /2/ для линии P(20) перехода $(00^0_1) \rightarrow (10^0_0)$ молекулы N_2O .



Р и с. I. Зависимости показателя усиления α и инверсной заселенности ΔN от давления P_0 в случаях 1 - сферического разлета ($R_0 = 5$ см) и 2 - цилиндрического ($R_0 = 1$ см). Смесь $N_2O:N_2 = (1:4)$, $T_0 = 850^\circ K$

Расчеты показали, что оптимальной является температура $T_0 \approx 850^\circ K$. Инверсия и показатель усиления при $P_0 = 10$ атм достигают следующих максимальных значений:

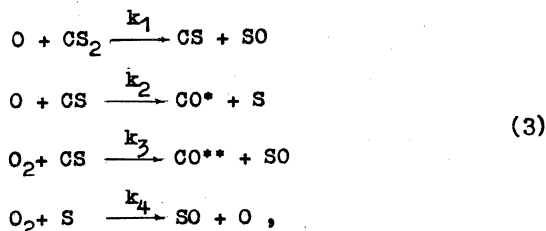
- разлет шара ($R_0 = 5$ см) - $\Delta N_{\max} \approx 2,2 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$ и $\alpha_{\max} \approx 1,6 \cdot 10^{-4}$ см $^{-1}$ при $r = R/R_0 \approx 9$;
- цилиндрический разлет ($R_0 = 1$ см) - $\Delta N_{\max} \approx 2 \cdot 10^{14}$ см $^{-3}$, $\alpha_{\max} \approx 1,4 \cdot 10^{-3}$ см $^{-1}$ при $r \approx 6$.

Результаты расчетов усиления и инверсии в случае разлета сферы и цилиндра в зависимости от давления P_0 приведены на рис. I.

Оценку величины усиления луча, проходящего через граничную область в разлетающемся облаке, можно получить, если считать, что длина оптического пути равна радиусу шара, т.е. $z = R\alpha$. Оказывается, что $z_{\max} \approx 10^{-2}$ и усиление незначительно ($e^z \approx 1,01$). В случае цилиндрического разлета и при оптическом пути, параллельном оси цилиндра, $z_{\max} = l\alpha_{\max}$ усиление будет определяться длиной l . При $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-3} \text{ см}^{-1}$ для получения усиления в e раз ($z = 1$) необходима длина l около 5 метров. Можно ожидать, что полученные величины являются типичными и для других смесей.

Второй из отмеченных выше факторов - наличие в верхней атмосфере свободных атомов и радикалов - приводит к эффективной накачке молекул за счет химических реакций. Рассмотрим основные особенности возникновения инверсной заселенности в ходе химических реакций на примере разлета CS_2 на высоте $\sim 90 \text{ км}$.

Используя модель верхней атмосферы /3/, находим, что газовая температура здесь составляет $T \approx 200^\circ\text{K}$, а плотности частиц равны: атомов кислорода $[\text{O}] \approx 1,6 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, молекул $[\text{O}_2] \approx 1,4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, эффективно будут идти процессы /4,5/:



где константы скоростей реакций k_1, k_2, k_3, k_4 соответственно равны $3,5 \cdot 10^{-12}$, $3,5 \cdot 10^{-11}$, $6,8 \cdot 10^{-11}$ и $2,2 \cdot 10^{-12} \text{ см}^3/\text{с}$. Максимум возбуждения колебательно-возбужденных молекул $\text{CO}^*(n)$ находится при $n = 13$; распределение $\text{CO}^{**}(n)$ неизвестно.

Для получения инверсии необходимо, чтобы скорость образования возбужденных молекул CO в реакциях (3) была выше скоростей релаксационных процессов по колебательным уровням. При плотностях $< 10^{16} \text{ см}^{-3}$ основным релаксационным процессом является радиационный распад, характерное время которого для высоких колебательных уровней $\text{CO}(n \sim 20)$ достигает $\sim 3 \cdot 10^{-3} \text{ сек}$ /6/.

В принципе, если бы происходила достаточно полная переработка атомарного и молекулярного кислорода в CO , то усиление было бы значительным ($\sim 10^{-4} + 10^{-3} \text{ см}^{-1}$) уже при небольших выбросах вещества. Однако для данной конкретной реакции расчет показал, что при начальных плотностях $[\text{CS}_2]_0 \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ атомарный кислород почти полностью переходит в SO . В этом и состоит основное ограничение в получении значительного усиления. При учете только первой и третьей реакции за время $t = 10^{-3} \text{ с}$ при цилиндрическом разлете $[\text{CO}^*] \approx 1,4 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Отметим, что если бы распадение CO^{**} было аналогично CO^* , то коэффициент усиления составил бы $\sim 10^{-6} \text{ см}^{-1}$. Очевидно, что концентрации $[\text{CO}^*]$ и $[\text{CO}^{**}]$ могут быть существенно выше при учете второй и четвертой реакции, а также при выпуске в атмосферу вместо CS_2 смеси $\text{CS}_2 + \text{O}_2$. Но главное не в этом. Проведенный анализ показал принципиальную возможность получения очень большого усиления при наличии благоприятного соотношения между константами реакций. Однако подбор конкретных реакций затруднен в настоящее время незнанием констант ряда элементарных процессов.

Третий фактор — наличие в верхних слоях атмосферы свободных электронов — также может способствовать созданию искусственной инверсии в областях повышенных электрических полей /2/. В этих областях энергия электронов оказывается достаточной для эффективного возбуждения колебаний молекул ($T_e \sim 0,3 \div 0,4 \text{ эВ}$ в перпендикулярных и $T_e \sim 0,5 \div 1 \text{ эВ}$ в продольных полях). Несмотря на небольшую плотность электронов ($\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$) может образоваться инверсная заселенность $\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$ и усиление $\sim 10^{-6} \text{ см}^{-1}$ за время $\sim 10^{-2}$ сек на невысоких возбужденных уровнях ($n \leq 8$) разлетающегося в пустоту газа CO . Четвертый фактор — образование инверсии в следах тел, пролетающих через атмосферу. Летящее тело, взаимодействуя с воздухом, порождает ударную волну с резким скачком температуры и давления, и создаются условия для протекания химических реакций с образованием возбужденного NO . В /7/ был дан детальный анализ этих реакций в следах тел метеорного происхождения и установлено, что заметная доля образующегося NO находится в колебательно-возбужденном состоянии, а колебательная температура, начиная с некоторого расстояния от тела вдоль следа, может более чем на порядок превышать газовую. Отклонение от равновесия и плотность возбужденных молекул в следе определяются ско-

ростью и поперечным размером тела, а также высотой полета и могут составлять $\sim 10^{13}$ см⁻³ для высот 60-70 км (на больших высотах сильно падает плотность, на меньших - возрастает скорость релаксации).

Коэффициенты усиления могут составлять $\sim 10^{-5}$, однако детальные оценки затруднены отсутствием данных по функции распределения заселенностей в NO. Наряду с NO инверсная заселенность может возникать при разлете плазмы, образующейся вокруг спутника на активном участке. К сожалению, конкретные вычисления в этом важном случае затруднены неразработанностью кинетики ионно-молекулярных реакций.

Таким образом, в целом наиболее перспективным для получения эффективного усиления представляется второй фактор, связанный с наличием свободных атомов и радикалов в атмосфере. Важно подчеркнуть и незначительность выбросов вещества, приводящих к заметной инверсии (I + 100 г). С точки зрения вопросов связи большой интерес представляет инверсия за счет ударных волн.

Поступила в редакцию
30 ноября 1976 г.

Л и т е р а т у р а

1. Б. Ф. Гордиец, М. Н. Марков, Л. А. Шелепин, *Космические исследования*, 8, 437 (1970).
2. А. С. Бириков, А. Ю. Волков, А. И. Демин, Е. М. Кудрявцев, Д. А. Кулагин, Н. Н. Соболев, Л. А. Шелепин, *ЖЭТФ*, 68, 1664 (1975).
3. CIRA, *Cospar International Reference Atmosphere*, Academic-Verlag, Berlin, 1972.
4. R. D. Stuart, P. H. Dawson G. H. Kimbell, *J. Appl. Phys.*, 43, 1022 (1972).
5. H. T. Powell, J. D. Kelley, *J. Chem. Phys.*, 60, 2191 (1974).
6. J. W. Rich, *J. Appl. Phys.*, 42, 2719 (1971).
7. А. С. Бириков, Б. Ф. Гордиец, М. Н. Марков, Л. А. Шелепин, *Препринт ФИАН № 59*, 1971 г.