

РЕЛАКСАЦИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВОЗБУЖДЕННОГО
АЗОТА С УЧЕТОМ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ

Т. Е. Андреева, С. И. Грицинин, И. А. Косный,
В. П. Силаков

УДК 531

Проведено теоретическое исследование релаксации азота, колебательно-возбужденного в ограниченном слое. Показано, что газовая динамика может оказывать существенное влияние на процесс релаксации. Выявлен эффект "замораживания" колебательной неравновесности.

В связи с интенсивным изучением неравновесных разрядных явлений в мощных молекулярных лазерах продолжают представлять интерес задачи о релаксации колебательно-возбужденных газов. До сих пор теоретическое рассмотрение таких задач проводилось в основном для неподвижного газа (см. /1/). Однако, так как газ возбуждается в объеме конечных размеров, то повышение температуры и давления в области неравновесности в ряде случаев может привести среду в движение, которое изменит режим релаксации в этой области. В настоящей работе изучается влияние газодинамики на процесс релаксации колебательно-возбужденного азота, моделируемого системой ангармонических осцилляторов.

Пусть первоначально покоящийся газ занимает пространство $0 < x < \infty$, где поступательно-вращательная температура $T(x, 0) = T_0$. При этом в области $0 < x \leq L_0$ "температура" первого колебательного уровня $T_1(x, 0) = T_{10} > T_0$, а в области $L_0 < x < \infty$ $T_1(x, 0) = T_0$. Неравновесность возбужденного газа считается такой, что его нагрев за счет процессов $V-T$ обмена преобладает над нагревом за счет процессов нерезонансного $V-V$ обмена. Кроме того, задача решается для случая, когда процесс формирования стационарной функции распределения молекул по колебательным уровням

является быстрым, так что выполняется условие квазистационарности.

В указанных приближениях уравнение для изменения числа колебательных квантов и уравнение, выражающее закон сохранения энергии, имеют следующий вид:

$$\frac{\partial s}{\partial t} + v \frac{\partial s}{\partial x} = - \frac{s - s_p(T)}{\tau_{VT}}, \quad (I)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(\frac{5}{2} kT + \frac{mv^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho v \left(\frac{7}{2} kT + \frac{mv^2}{2} \right) \right] = \rho \hbar \omega_0 \frac{s - s_p(T)}{\tau_{VT}}.$$

Здесь s - среднее число колебательных квантов, приходящихся на одну молекулу, $s_p(T) = s|_{T=T_1}$, τ_{VT} - характерное время v - T релаксации, ρ и v - плотность и скорость газа, m - масса молекулы, $\hbar \omega_0$ - энергия колебательного кванта. Конкретный вид зависимостей $s(T, T_1)$ и $\tau_{VT}(\rho, T, T_1)$ определяется соотношениями, взятыми из [1].

Уравнения (I) решались численно совместно с уравнениями

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} = - \frac{k}{\rho r} \frac{\partial(\rho T)}{\partial x},$$

которые соответствуют законам сохранения массы и импульса. Результаты численного решения получены при начальных значениях температуры $T_0 = 300$ К, плотности $\rho(x, 0) = 1,25 \cdot 10^{-3}$ г/см³ ($0 < x < \infty$) и толщины неравновесного слоя $L_0 = 0,4$ см. Скорость в начале координат $v(0, t) = 0$.

Анализ профилей плотности $\rho(x)$ и температур $T(x)$ и $T_1(x)$ для разных моментов времени показывает, что практически во всей области неравновесности параметры газа распределены однородно.

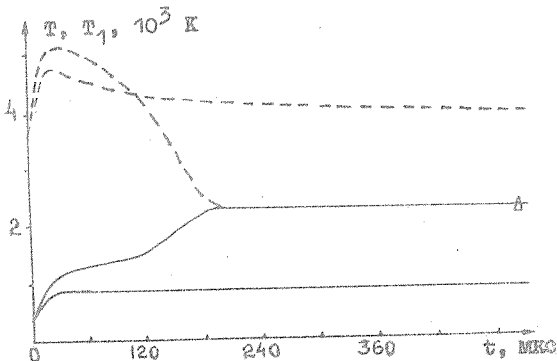
Сначала газ практически не расширяется и эффективно протекающие процессы v - T обмена приводят к росту температуры и давления. При этом рост температуры и уменьшение степени неравновесности сопровождаются уменьшением скорости релаксации (такое явление характерно для квазистационарной теории релаксации сильно неравновесной системы ангармонических осцилляторов). Через промежуток времени $L_0/c \approx 10$ мкс (c - скорость звука) газ приходит в движение и плотность его начинает быстро падать, а

вслед за ней падает давление.

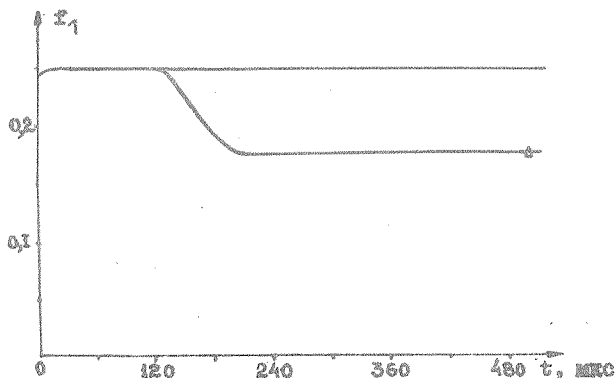
Отметим, что повышение давления обеспечивает ускоренное движение границы области неравновесности. Оно остается ускоренным и после того как давление начинает падать. Длится это до момента времени t_* , когда градиент давления на границе меняет знак. Ускоренное перемещение границы означает, что расширяющийся слой действует на окружающий газ как ускоренно движущийся поршень, который, как известно /2/, генерирует либо простую волну сжатия, либо ударную волну. Вид волны определяется степенью неравновесности в начальный момент. В рассматриваемом примере ударные волны возникают при $T_{10} > 3000$ К.

В последующие моменты времени ($t > t_*$) процесс расширения замедляется и становится почти изотермическим. Появляется волна разрежения, а в области неравновесности давление продолжает падать до значений меньших первоначального (расширение идет по инерции). Закономерности изменения величин T и T_1 со временем для $T_{10} = 3500$ К ($t_* \approx 25$ мкс) представлены на рис. 1.

Сравним характер релаксации неравновесного газа в этом случае и в случае, когда газ может оставаться неподвижным в течение всего процесса ($L_0 \gg c\tau_{VT}|_{v=0}$). Релаксация колебательной



Р и с. 1. Временные зависимости величин T и T_1 в ограниченном (—; ---) и бесконечно большом (—△; ---△) слоях колебательно-возбужденного газа



Р и с. 2. Временные зависимости относительной заселенности первого колебательного уровня молекул колебательно-возбужденного газа в ограниченном (—) и бесконечно большом (---) слоях

энергии и выравнивание температур T и T_1 (см. рис. 1) в неподвижном газе происходят существенно быстрее. При этом релаксация проходит наиболее эффективно вначале, когда газ находится в сильно неравновесном состоянии, и в конце, когда его температура становится достаточно большой, так что процессы $V-T$ обменов протекают ускоренно. Колебательная энергия в неподвижном газе полностью релаксирует за 220 мкс. В случае, когда учитывается движение газа, равновесие не достигается даже за большие промежутки времени, т.е. наблюдается эффект "замораживания" колебательной неравновесности, который может быть использован для улучшения характеристик работы молекулярных газоразрядных лазеров.

В заключение отметим, что справедливость выбранной модели релаксации колебательно-возбужденного газа может быть проверена с помощью метода CO или CO_2 "следа", который по инфракрасному излучению малой добавки из молекул CO или CO_2 позволяет восстановить временную зависимость относительной заселенности первого колебательного уровня молекул азота $f_1(t)$. На рис. 2 изображены теоретические зависимости $f_1(t)$ для сопоставленных

выше вариантов релаксации. Заметное отличие значений f_1 в этих случаях наблюдается при $t > 150$ мкс.

Поступила в редакцию
15 декабря 1982 г.

Л и т е р а т у р а

1. Б. Ф. Гордиев, А. И. Осипов, Л. А. Шелепин, Кинетические процессы в газах и молекулярные лазеры, "Наука", М., 1980 г., гл. 4, § 5.
2. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц, Механика сплошных сред, Гостехиздат, М., 1954 г., с. 456.