

ЭФФЕКТ ЗАСЕЛЕНИЯ ВЕРХНИХ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ УРОВНЕЙ В ПРОЦЕССЕ СВОБОДНОГО РАСШИРЕНИЯ ГАЗА С КЛАСТЕРАМИ

Н.В.Карелов, А.К.Ребров, Р.Г.Шарафутдинов

Одновременное протекание различных релаксационных процессов, в том числе и конденсации, может представить новые возможности для создания лазерных сред и изменения свойств или состояния одного из компонентов при разделении газов. Ранее в [1] исследовано нарушение бальмовского распределения по вращательным уровням молекул азота при свободном его расширении из звукового сопла. Было указано на наличие "аномалии" в заселенности уровней при больших давлениях торможения, когда возможно протекание конденсации.

Целью данной работы явилось исследование кинетики заселенностей вращательных уровней молекул азота при совместном протекании процессов вращательной релаксации и конденсации в расширяющемся потоке азота и смеси азота с углекислым газом. Исследование проводилось на газодинамической установке низкой плотности Института теплофизики СО АН СССР [2] с использованием электронно-пучковой диагностики для определения заселенностей вращательных уровней в основном состоянии молекул азота [1]. Измерения проводились на оси струи за звуковыми соплами диаметром критического сечения $d_* = 2,11$ и $0,54$ мм при комнатной температуре торможения в диапазоне значений $P_0 d_*$ от 100 до 5000 (P_0 - давления торможения в мм рт. ст.). Полученные данные относятся к области потока, где давление газа больше давления насыщенных паров. Пересыщение могло быть весьма значительным, так как оно не снимается конденсацией при быстром расширении в струе.

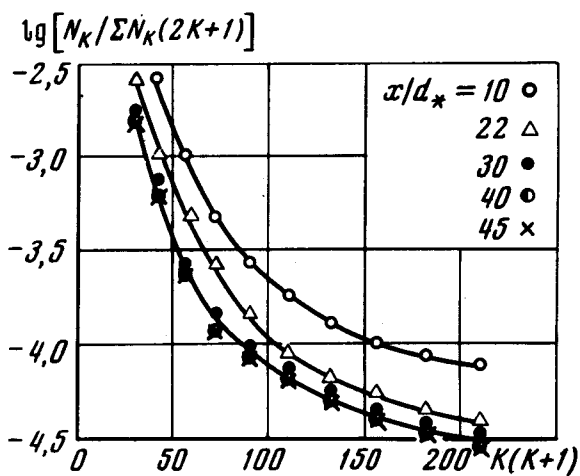


Рис. 1. Кинетика заселенностей вращательных уровней при расширении газа без конденсации. N_K - заселенность K -го вращательного уровня

На рис. 1 представлены результаты измерения относительных невырожденных заселенностей вращательных уровней азота на различных расстояниях от среза сопла ($x/d_* = 10 \div 45$) в зависимости от кванто-

вого числа. Эксперименты проводились в чистом азоте на сопле с $d_* = 2,1 \text{ мм}$ при относительно низком давлении торможения $P_0 = 650 \text{ мм рт. ст.}$, когда роль конденсации незначительна. С увеличением расстояния от среза сопла заселенности верхних и средних уровней уменьшаются, а самых нижних — растут. При более глубоком расширении происходит последовательное замораживание заселенностей верхних уровней, и, следовательно, нормированные по плотности, они не зависят от x/d_* . Чем выше значение вращательного квантового числа, тем ближе к срезу сопла наблюдается замораживание.

Характер изменения заселенностей уровней в потоке конденсирующегося газа существенно отличный. На рис. 2 показано распределение заселенностей примерно на тех же расстояниях от среза сопла, что и на рис. 1, но при значительно более высоком парциальном давлении азота ($P_0 = 2035 \text{ мм рт. ст.}$) при наличии $\sim 8\% \text{ CO}_2$. До $x/d_* = 10$ протекает, в основном, конденсация углекислого газа. Распределение заселенностей на первых восьми уровнях больцмановское, с температурой $T_R \sim 51,6 \text{ К}$. Следующая точка измерения $x/d_* = 22$ находится уже далеко за кривой фазового перехода для азота, относительные заселенности уровней изменились в сторону уменьшения на высоких и средних уровнях и в сторону увеличения на самых низких, т.е. так же как в потоке без влияния конденсации (рис. 1). Исчез участок с больцмановским распределением.

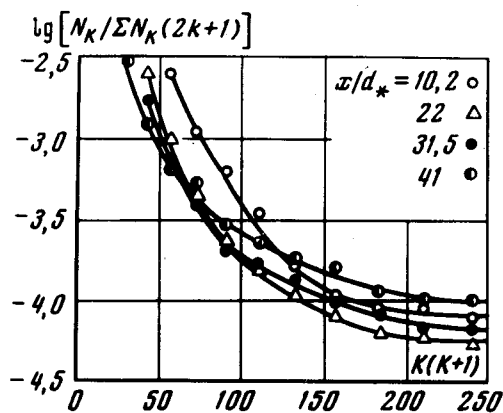


Рис. 2. Кинетика заселенностей вращательных уровней при совместном протекании вращательной релаксации и конденсации

Неожиданным оказалось поведение заселенностей верхних уровней при дальнейшем расширении. При $x/d_* > 22$ заселенности средних уровней упала, а нижних — возросла в соответствии с тенденциями вращательной релаксации. Заселенности верхних уровней, начиная с восьмого, поднялась; причем при $x/d_* = 40$ для нескольких последних уровней почти в два раза. Этот эффект, обнаруженный так же и в экспериментах с чистым азотом при высоком давлении торможения, противоречит

ходу вращательной релаксации при расширении однородного газа и может быть связан с особенностями протекания вращательной релаксации при наличии кластеров.

Представляется очевидным наличие источника молекул, возбужденных на верхние вращательные уровни, преобладающего над стоком. Таким источником может быть эмиссия молекул с поверхности кластера.

Механизм дополнительного заселения представляется следующим. Из потока молекул, падающих на кластеры захватываются, в основном, молекулы имеющие низкие вращательные квантовые числа. Молекулы с высокими значениями квантового числа отражаются от кластеров и их распределения изменяются незначительно. Молекулы из кластеров имитируются с больцмановским распределением при температуре T_R , равной температуре кластеров. Следовательно, в потоке дополнительно появляются вращательно возбужденные молекулы. Непрерывное протекание процессов захвата — эмиссии приводит к накоплению молекул на тех верхних уровнях, которые не успевают опустошаться за счет вращательной релаксации. Заметим, что накачка верхних уровней происходит за счет тепла конденсации. Как указывалось выше, одним из определяющих процессов является селективный захват вращательно возбужденных молекул. Роль вращательного возбуждения на процесс конденсации обсуждался в литературе [3, 4]. Оценки для условий эксперимента, приведенного на рис. 2 показывают, что среднее число бинарных столкновений каждой молекулы на пути от $x/d_* = 22$ до $x/d_* = 40$, т.е. на участке дополнительного заселения порядка 100. Это означает, что при доле конденсата 10%, что можно ожидать для данных условий, каждая молекула многократно участвовала в процессе захвата — эмиссии. При температуре кластеров, близкой к температуре насыщения (для данных условий ~ 50 К), заселение верхних уровней эмиссией с кластеров сравнимо с экспериментально измеренным, что подтверждает реальность приложенного механизма.

Институт теплофизики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
15 ноября 1977 г.

Литература

- [1] Б.Н.Борзенко и др. ПМТФ, №5, 20, 1976.
- [2] А.А.Бочкарев и др. Кн.: "Экспериментальные методы в динамике разреженных газов", Новосибирск, изд. ин-та теплофизики СО АН СССР, 1974.
- [3] R.E.Leckenby, E.J.Robbins. Proc. Roy. Soc., A291, 389, 1966.
- [4] В.К.Конюхов, В.Н.Файзулаев. Препринт №32, ФИАН, 1976.