

## НЕПРЕРЫВНЫЕ СПЕКТРЫ ИОНОВ АЗОТА И КИСЛОРОДА ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*Г. А. Кобзев*

Перенос излучения — один из основных факторов, определяющих перенос энергии и развитие газодинамических процессов в горячих газах. Современная теория переноса излучения базируется на использовании реальных оптических свойств горячего газа, для которого характерно наложение большого числа различных континуумов и спектральных линий атомов и ионов. В работах [1—3] рассмотрены оптические свойства некоторых горячих газов при температурах до 20 000° К, в частности воздуха. Оптические свойства воздуха при температурах  $> 20\,000^\circ\text{К}$  частично рассматривались в [4—8]. Однако эти работы относятся либо к температурам, где присутствуют только Li-подобные ионы [7], либо рассмотрены лишь некоторые интегральные характеристики [4—6, 8].

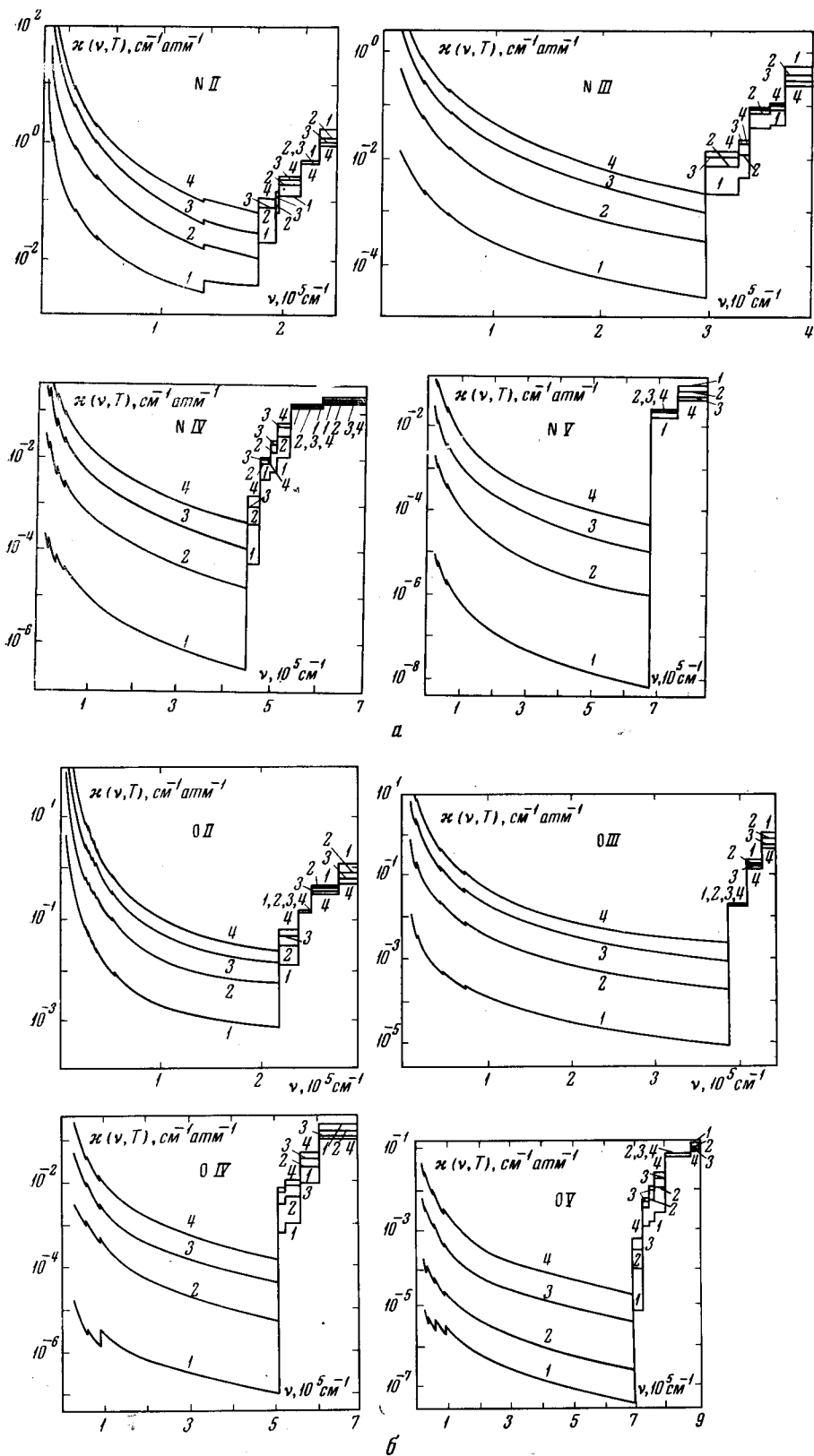


Рис. 1. Суммарные сечения поглощения ионов азота (а) и кислорода (б), обусловленные фотоионизацией и свободно-свободными переходами, для различных температур:

1 —  $T = 40\,000^\circ\text{K}$ ; 2 —  $60\,000^\circ\text{K}$ ; 3 —  $80\,000^\circ\text{K}$ ; 4 —  $100\,000^\circ\text{K}$

В данной работе рассмотрен коэффициент поглощения непрерывного спектра ионов азота и кислорода при температурах 40 000—100 000° К, рассчитаны коэффициенты поглощения воздуха для ряда условий, обсуждается влияние спектральных линий на непрерывный спектр. Непрерывные спектры горячих газов при температурах выше 20 000° К определяются фотоионизацией и свободно-свободными переходами в поле ионов. Сечения фотоионизации в данной работе вычислялись следующим образом.

1. Фотоионизация основных конфигураций  $2s^2 2p^3$  иона OII,  $2s^2 2p^2$  NII и OIII,  $2s^2 2p$  NIII и OIV,  $2s^2$  NIV и OV,  $2s$  NV, а также первых возбужденных конфигураций  $2s 2p^4$  OII,  $2s 2p^3$  NII,  $2s 2p^2$  NIII и OIV,  $2s 2p$  NIV и OV и  $2p^2$  NIV и  $2p$  NV рассчитывалась по методике [9]. Исходные данные для расчета волновых функций связанного состояния взяты по данным [10], необходимые сведения об энергиях термов — по [11].

2. Фотоионизация возбужденных уровней  $3d$  ионов OII, NII, OIII, NIII, OIV, NIV и OV и  $3p$ -уровней NIV и OV рассчитывалась также согласно [9]. Источники исходных данных те же, что и в первом случае.

3. Фотоионизация уровней  $3s$  всех ионов, уровней  $3p$  ионов OII, OIII, OIV, NII, NIII, NV, уровней  $3d$  ионов NV рассчитывалась по методу квантового дефекта [12]. Необходимые для расчета значения энергий уровней взяты по [11].

4. Фотоионизация уровней выше  $3d$  для всех ионов учитывалась совместно со свободно-свободными переходами в полях остаточных ионов по интегральной формуле Бибермана — Нормана [13]. Фактор  $\xi$  полагался равным 1.

На рис. 1 (а и б) приводятся суммарные сечения  $\kappa(\nu, T)$  ионов азота и кислорода различной кратности, рассчитанные на единичное давление ионов. При расчете сечений  $\kappa(\nu, T)$  вводился фиксированный сдвиг [2] порогов фотоионизации, эффективно учитывающий сливающиеся в условиях плазмы верхние члены спектральных серий.

С использованием величин  $\kappa(\nu, T)$  для ионов азота и кислорода были рассчитаны коэффициенты непрерывного поглощения воздушной плазмы при температурах 40 000—100 000° К для значения относительной плотности  $\rho/\rho_0 = 10^{-2}$  в интервале энергий до  $1\,200\,000\text{ см}^{-1}$ . В этом интервале переносится основная доля лучистой энергии в рассмотренных условиях. Состав воздушной плазмы взят по данным [6]. Результаты расчета представлены на рис. 2.

На рис. 3 приведены результаты расчета коэффициента поглощения воздушной плазмы при  $T = 60\,000^\circ\text{ К}$  для двух значений  $\rho/\rho_0$  ( $10^{-4}$  и  $10^{-2}$ ) с учетом спектральных линий. Учитывались наиболее сильные спектральные линии. Силы осцилляторов брались по [14]. Для линий, отсутствующих в [14], силы осцилляторов оценивались по [15], а также по таблицам Бейтса — Дамгаард. Уширение спектральных линий ионов рассчитывалось в ударном приближении по методике, разработанной автором данной работы [16]. Учтено уширение за счет соударений с электронами. Роль уширения ионами в центральной части линии мала, в крыльях же они могут играть заметную роль. Поэтому результаты для крыльев линий можно рассматривать как оценку по минимуму. На рис. 3 пунктиром изображен расчет континуума за счет фотоионизации и свободно-свободных переходов. Для  $\rho/\rho_0 = 10^{-4}$  роль дополнительного континуума, связанного с перекрытием крыльев линий, сравнительно невелика. С увеличением  $\rho/\rho_0$  роль этого континуума значительно возрастает и уже при  $\rho/\rho_0 = 10^{-2}$  им нельзя пренебрегать при рассмотрении непрерывного спектра.

Таким образом, вывод [1—3] о значительной роли континуума, связанного с перекрытием крыльев линий, справедлив и для плазмы при более высоких температурах. Для уточнения величины этого континуума необходимо учесть квазистатическое уширение ионами для крыльев линий.

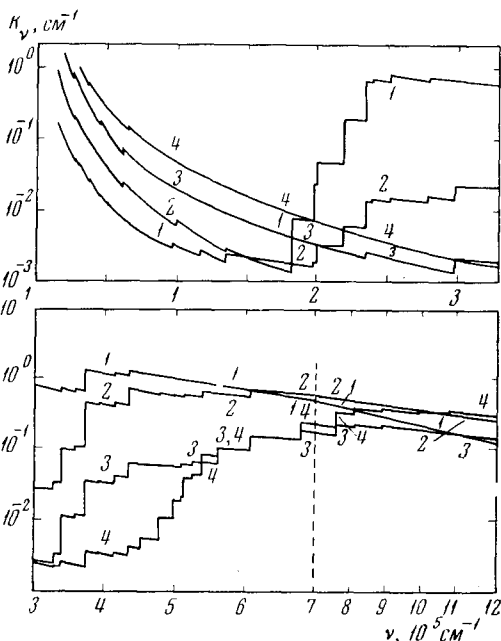


Рис. 2. Коэффициент поглощения воздуха в континууме для относительной плотности  $\rho/\rho_0 = 10^{-2}$ . Масштаб по оси абсцисс различный в интервалах: до  $3 \cdot 10^5\text{ см}^{-1}$ , от  $3 \cdot 10^5$  до  $7 \cdot 10^5\text{ см}^{-1}$  и больше  $7 \cdot 10^5\text{ см}^{-1}$ .

1 —  $T = 40\,000^\circ\text{ К}$ ; 2 — 60 000; 3 — 80 000; 4 — 100 000

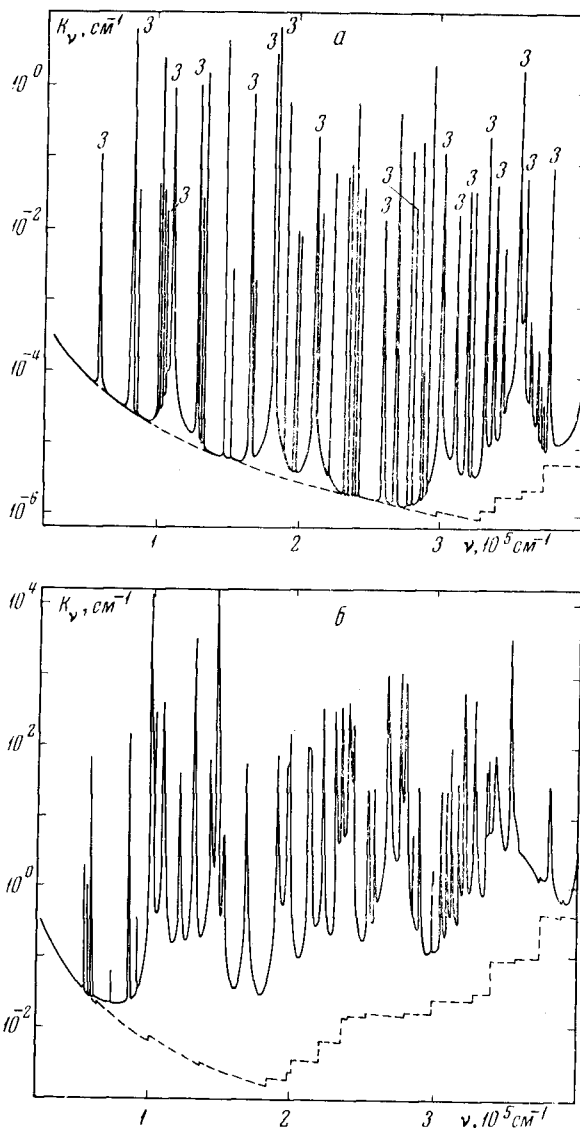


Рис. 3. Коэффициент поглощения воздуха при  $T = 60\,000^\circ\text{K}$  для значений  $\rho/\rho_0$   $10^{-4}$  (а) и  $10^{-2}$  (б) с учетом спектральных линий. Цифра 3 над некоторыми линиями указывает, что коэффициент поглощения в центре данной линии уменьшен на три порядка (пунктир — континуум, обусловленный фотоионизацией и свободно-свободными переходами в полях ионов)

Автор благодарит Л. М. Бибермана, В. И. Краснова, Г. Э. Нормана и В. М. Сергеева за помощь в работе и обсуждение результатов, Л. Косыреву и А. Полянского за помощь при проведении расчетов.

Институт высоких температур  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
31 III 1970

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Биберман, В. С. Воробьев, Г. Э. Норман, И. Т. Якубов, Космические исследования, 2, 441, 1964.
2. И. В. Авилова, Л. М. Биберман, В. С. Воробьев, В. М. Замалин, Г. А. Кобзев, А. Н. Лагарьков, А. Х. Мнацаканян, Г. Э. Норман. JQSRT, 9, 89, 113, 1285, 1969.
3. И. В. Авилова, Л. М. Биберман, В. С. Воробьев, В. М. Замалин, Г. А. Кобзев, А. Х. Мнацаканян, Г. Э. Норман. Теплофизика высоких температур, 8, № 1, 1970.

4. Ю. П. Райзер. Ж. эксперим. и теор. физ., 37, № 4, 1959.
  5. В. Н. Armstrong, R. Meuserott. Phys. Fluids, 3, 139, 1960.
  6. Н. М. Кузнецов. Термодинамические функции и ударные адиабаты при высоких температурах. «Машиностроение», 1965.
  7. А. В. Иванова, С. А. Солодченкова. Оптика и спектроскопия, 20, 399, 1966.
  8. В. Н. Armstrong, R. R. Johnston, P. S. Kelly, H. Dewitt, S. G. Brush. Progress in High Temp. Phys. and Chem., I, Pergamon Press, 1967.
  9. Г. А. Кобзев, В. М. Сергеев. Теплофизика высоких температур, 7, 566, 1969.
  10. C. C. S. Roothaan, P. S. Kelly. Phys. Rev., 131, 1177, 1963; P. S. Kelly, Astrophys. J., 140, 1247, 1964; H. Piennig, E. Trefftz. JQSRT, 5, 335, 1965.
  11. Ch. Moore. Tables Atomic Energy Levels. NBS, Washington, 1949.
  12. A. Burgess, M. J. Seaton. Monthly Notices Roy. Astron. Soc., 120, 121, 1960.
  13. Л. М. Биберман, Г. Э. Норман. Успехи физ. наук, 91, 193, 1967.
  14. W. L. Wiese, M. W. Smith, B. M. Glennon. Atomic Transition Probabilities, I, NBS, 1966.
  15. Г. А. Кобзев, В. М. Сергеев. Теплофизика высоких температур, 7, 1012, 1969.
  16. Г. А. Кобзев. Оптика и спектроскопия, 29, № 5, 1970.
- 

УДК 537.523