

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ВОЗДУХА

А. А. Коныков и А. В. Воронцов

Измерены коэффициенты поглощения воздуха в диапазоне температур 6000—8500° К, давлений 40—95 атм., длин волн 2—6 мкм. Показано, что порлощение, обусловленное свободно-свободными переходами электронов в полях нейтральных частиц, может быть интерпретировано на основе соотношения, полученного Фиревоым и Чибисовым, если принять для сечений упругого рассеяния значения $\sigma'_N = 1.7 \times 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma'_N = 2.7 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma'_O = 2.3 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$, $\sigma'_O = 9.2 \cdot 10^{-15} \text{ см}^2$.

В работе [1] показано, что при определенных условиях входа космических аппаратов в атмосферу Земли лучистый тепловой поток может играть доминирующую роль в тепловом балансе аппарата. Точность вычисления лучистых тепловых потоков определяется прежде всего той точностью, с которой известны значения коэффициентов поглощения среды. В последние 10—15 лет опубликовано несколько десятков работ, посвященных исследованию излучения воздуха в видимой и ультрафиолетовой областях спектра. Инфракрасное излучение воздуха изучено значительно слабее.

Первые подробные сведения об инфракрасном излучении воздуха в интервале длин волн 2—8 мкм и температур 6000—8000° К содержатся в [2, 3]. В [3] на основе анализа экспериментальных данных сделан вывод о том, что излучение воздуха обусловлено в основном свободно-свободными переходами электронов в полях нейтральных атомов и молекул азота, кислород играет небольшую роль. Предложена эмпирическая зависимость, которая представляет собой соотношение Крамерса, где положено для молекулы азота $Z_{\text{эфф.}}^2 = 2.2 \cdot 10^{-2}$, для атома азота $Z_{\text{эфф.}}^2 = 0.9 \cdot 10^{-2}$, для атома кислорода $Z_{\text{эфф.}}^2 = 0.2 \cdot 10^{-2}$. Эти данные, по-видимому, являются заниженными, поскольку, как указано в [4], в работах [2, 3] возможна систематическая ошибка в измерении температуры газа. В работах [5, 6] проведены измерения излучательной способности воздуха ($\lambda = 6.1$ мкм), нагретого падающей ударной волной (интервал скоростей ударной волны 9.5—42.5 км/сек.). Авторы считают, что их данные могут быть интерпретированы в согласии с [2], однако внимательное рассмотрение сопоставления экспериментальных и расчетных данных показывает, что экспериментальные данные [5, 6] лежат систематически выше расчетных. Если увеличить $Z_{\text{эфф.}}^2$, взятые из [2], примерно в 2 раза, то можно получить полное согласие экспериментальных и расчетных значений. В работе [7] имеются данные об излучении воздуха в ближней инфракрасной области спектра. Здесь также констатируется согласие экспериментальных данных с расчетными на основе значений $Z_{\text{эфф.}}^2$, взятых из [2], однако и в этом случае следует отметить, что экспериментальные значения лежат выше расчетных. Экспериментальные значения интенсивности инфракрасного излучения воздуха, нагретого отраженной ударной волной, полученные в [8], интерпретированы в отличие от остальных работ, исходя из результатов работы [9]. Сравнение результатов работ [8] и [3] возможно, если при сравнении исходить из соотношений для сечений поглощения. Такое

сравнение показывает, что величины сечений поглощения для молекулы азота, полученные из [2, 8], в пределах ошибок измерения согласуются между собой, тогда как сечение поглощения для атома, согласно [8], существенно больше (в 3—4 раза), чем сечение, полученное, согласно [2]. Настоящая работа была близка к завершению, когда были опубликованы результаты исследования инфракрасного излучения воздуха [10], где предложено описывать излучение, обусловленное свободно-свободными переходами в нейтральных атомах и молекулах с помощью соотношения Крамерса, в котором величина заряда заменена эмпирически подобранным множителем

$$Z_{эфф.}^2 = a\lambda^b,$$

здесь λ — длина волны в мкм; значения параметров a и b даны ниже в таблице

Компонента	$T, ^\circ\text{K}$	$Z_{эфф.}^2 \cdot 10^2$ (среднее)	$a \cdot 10^2$	b
Атом кислорода	9700	1.7 ± 0.7	4.2	-0.70
Атом азота	9200	2.1 ± 0.6	4.1	-0.54
Молекула азота	8350	2.1 ± 0.5	5.3	-0.75

Авторы [10] отмечают, что их новые значения $Z_{эфф.}^2$ отличаются от более ранних [2], причем для атома азота новые данные примерно вдвое выше, чем полученные в [2]; для атома кислорода выше в несколько раз. В соответствии с этим значения k_λ для воздуха вдвое превышают значения, полученные в [2]. Отметим, что первые оценки $Z_{эфф.}^2$ для атомов азота и кислорода, сделанные в [11], не противоречат результатам [8, 10]. Таким образом, можно констатировать, что результаты работ [5-8, 10, 11] дают согласующиеся между собой значения интенсивности инфракрасного излучения воздуха. Исключение составляют работы [2, 3], что связано, по-видимому, с систематической ошибкой при определении температуры в [2, 3]. Почти все рассмотренные выше экспериментальные работы имеют тот недостаток, что ограничиваются эмпирическими соотношениями для описания инфракрасного излучения, обусловленного свободно-свободными переходами электронов в полях нейтральных компонент высокотемпературного воздуха. Это обстоятельство не способствует выяснению существа физических процессов, протекающих в рассматриваемом случае и затрудняет использование результатов этих работ, поскольку полученные эмпирические соотношения строго справедливы только в узком диапазоне параметров. Отметим также, что заметную роль в инфракрасном излучении воздуха играет молекула NO, излучение которой изучено слабо. Изложенное и побудило нас предпринять настоящую работу.

Воздух нагревался отраженной ударной волной в ударной трубе, конструкция которой описана в [4]. Схема и методика эксперимента идентична использованной там же. Все эксперименты были проведены при начальном давлении в камере низкого давления 25 мм рт. ст., что позволило получить воздух при температурах 6000—8500° К и давлениях 40—94 атм. Температура и давление воздуха за отраженной ударной волной рассчитывались по скорости падающей ударной волны с помощью законов сохранения. Основанием для такого расчета могут служить результаты работ [12, 13].

Исследование инфракрасного излучения воздуха проводилось в следующих участках спектра: 2.2, 3.2, 3.3, 4.5, 5.0, 6.0 мкм. Диапазон температур и давлений выбран таким образом, что в области 2—4 мкм влиянием линий атомов и полос молекул можно пренебречь, решающий вклад дают свободно-свободные переходы электронов в полях нейтральных частиц. В области 5—6 мкм необходимо учитывать также и излучение полос NO.

Рис. 1. Зависимость коэффициента поглощения воздуха для $\lambda=2.2$ мкм от температуры.

Точки — экспериментальные данные настоящей работы; 1 — расчет $Z_N^2 = 4.1 \cdot 10^{-2} \times \lambda^{-0.54}$, $Z_{N_2}^2 = 5.3 \cdot 10^{-2} \lambda^{-0.75}$, $Z_{O_2}^2 = 4.2 \cdot 10^{-2} \lambda^{-0.70}$, согласно [11], $Z_{O_2}^2 = 9.4 \times 10^{-2} \lambda^{-0.36}$, согласно [5]; 2 — расчет; $\sigma_N = 1.6 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_{N_2} = 2.7 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_O = 2.3 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_{O_2} = 9.2 \cdot 10^{-15}$ см², согласно [4, 14].

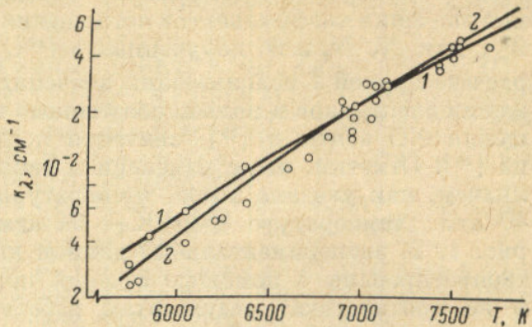


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения воздуха для $\lambda=3.8$ мкм от температуры.

Точки — экспериментальные данные настоящей работы; 1 — расчет $Z_N^2 = 4.1 \times 10^{-2} \lambda^{-0.54}$, $Z_{N_2}^2 = 5.3 \cdot 10^{-2} \lambda^{-0.75}$, $Z_{O_2}^2 = 4.2 \cdot 10^{-2} \lambda^{-0.70}$, согласно [10], $Z_{O_2}^2 = 9.4 \cdot 10^{-2} \lambda^{-0.36}$, согласно [4]; 2 — расчет, $\sigma_N = 1.6 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_{N_2} = 2.7 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_O = 2.3 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_{O_2} = 9.2 \cdot 10^{-15}$ см², согласно [4, 14].

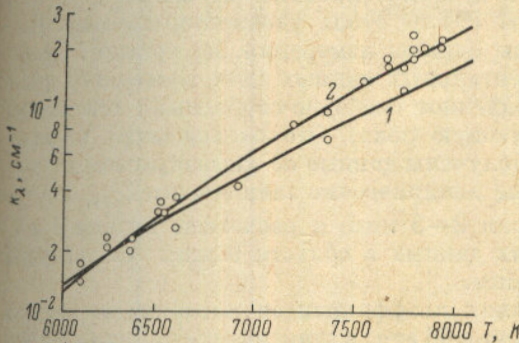


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения воздуха для $\lambda=6.0$ мкм от температуры.

Точки — экспериментальные данные настоящей работы; 1 — расчет $Z_N^2 = 4.1 \cdot 10^{-2} \lambda^{-0.54}$, $Z_{N_2}^2 = 5.3 \cdot 10^{-2} \lambda^{-0.75}$, $Z_{O_2}^2 = 4.2 \cdot 10^{-2} \lambda^{-0.70}$, согласно [10], $Z_{O_2}^2 = 9.4 \cdot 10^{-2} \lambda^{-0.36}$, согласно [4], вклад NO, согласно [16]; 2 — расчет, $\sigma_N = 1.6 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_{N_2} = 2.7 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_O = 2.3 \cdot 10^{-15}$ см², $\sigma_{O_2} = 9.2 \cdot 10^{-15}$ см², согласно [4, 14]; NO — согласно [13] 1' — вклад только свободно-свободных переходов на нейтральных частицах, согласно [17], 2' — вклад только свободно-свободных переходов на нейтральных частицах, согласно [4, 14], 3 — вклад только молекулы NO, согласно [15].

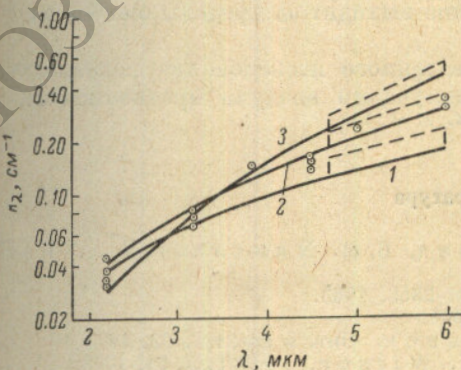
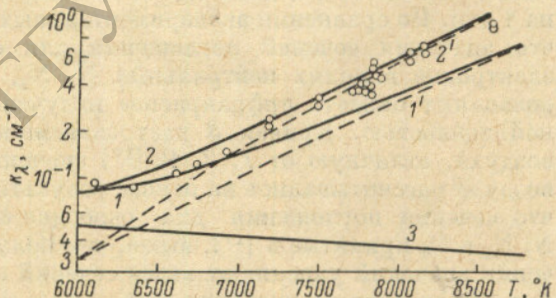


Рис. 4. Зависимость коэффициента поглощения воздуха от длины волны, $T=7500 \pm 50^\circ$ К, $p=66 \pm 1$ атм.

1 — расчет, согласно [10], 2 — расчет, согласно [3, 14], 3 — расчет [17]. Штриховые линии — вклад NO, согласно [15].

Полученные значения коэффициентов поглощения для длин волн 2.2, 3.3, 6.0 мкм приведены на рис. 1—3. Здесь же для сравнения даны расчетные значения коэффициентов поглощения. Кривая 1 рассчитана с помощью $Z_{\text{эфф}}^2$ для N, N₂ и O, полученных в [10], данные для O₂ взяты из [4]; при расчете кривой 2 использованы значения сечений поглощения при торможении электронов в полях, полученные в [4, 14]. Значения сечений поглощения NO взяты в [15], значения концентраций отдельных компонентов из [16]. Отметим, что с изменением температуры изменяется и давление, причем, как указано выше, температуре 6000° К соответствует давление 40 атм., температуре 8500° К — 94 атм. Как следует из рассмотрения рис. 1, 2, экспериментальные данные настоящей работы могут быть интерпретированы с помощью сечений поглощения, полученных в [4, 14] и не противоречат результатам работы [10]. Аналогичные результаты получены для 3.2 и 4.5 мкм. В области 6 мкм (рис. 3) значения коэффициентов поглощения могут быть интерпретированы на основе [4, 14, 15]. Согласие с результатами работы [10] не столь удовлетворительное. Расхождение не выходит за пределы ошибок измерения, но кривая 1 лежит систематически ниже экспериментальных данных (для температур выше 6500° К, где излучение, обусловленное свободно-свободными переходами на нейтралах, играет доминирующую роль). Это расхождение, по-видимому, связано с тем, что в [10] получены данные об инфракрасном излучении воздуха и соответствующие эмпирические зависимости $Z_{\text{эфф}}^2$ для его компонент в интервале длин волн 2—5 мкм, а расчетные кривые 1 и 1' (рис. 3) есть экстраполяция этих данных в области 6 мкм. Аналогичный результат получен и для $\lambda=5$ мкм.

На рис. 4 приведены значения коэффициентов поглощения воздуха для температуры 7500° К и давления 66 атм. в зависимости от длины волны. Здесь приведены все те экспериментальные значения коэффициентов поглощения, которые соответствуют значениям T , не отличающимся от 7500° К более, чем на 50°, и давлениям, не отличающимся от 66 атм. более, чем на 1 атм. Из сравнения экспериментальных данных и кривых 1, 2 следует, что значения сечений поглощения для свободно-свободных переходов электронов в полях нейтральных N, N₂, O и O₂, полученные в [4, 14], позволяют описать инфракрасное излучение воздуха с удовлетворительной точностью. Кривая 3 дает зависимость коэффициента поглощения воздуха, отличную от 1, 2. В [17] значения коэффициентов поглощения воздуха рассчитывались на основе результатов работы [18], но отмечается, что сечения поглощения для свободно-свободных переходов в полях N, N₂ и O, принятые в [17], выше, чем полученные в [18]. Причины увеличения значений указанных выше сечений в [17] не излагаются. Поглощение, обусловленное свободно-свободными переходами в полях O₂, а также вклад молекулы NO в области 4.7 мкм и выше в [17] не учитывался. Как следует из рассмотрения рис. 4, кривая 3 в области 2.2 мкм лежит ниже экспериментальных данных, тогда как в области 6.0 мкм она существенно превышает их, причем это расхождение выходит за пределы ошибок измерения.

Таким образом, результаты проведенного исследования показывают, что для описания инфракрасного излучения воздуха предпочтительнее пользоваться результатами работ [4, 9, 14, 15].

Литература

- [1] А. А. Коньков, В. Я. Нейланд, В. М. Николаев, Ю. А. Пластикин. ТВТ, 7, 140, 1969.
- [2] R. L. Taylor. J. Appl. Phys., 39, 2353, 1963.
- [3] R. L. Taylor. IQSRT, 4, 239, 1964.
- [4] А. А. Коньков, А. В. Воронцов. Опт. и спектр., 32, 1972.
- [5] R. A. Allen, A. Textoris, J. Wilson. IQSRT, 5, 91, 1965.
- [6] J. Wilson. Phys. Fluids, 9, 1913, 1966.
- [7] Моррис, Бах, Крей, Либерман, Йос. Ракетная техника и космонавтика, 4, 95, 1966.

- [8] Ю. А. Пластинин. Сб. «Физическая газодинамика ионизированных и химически реагирующих газов», под ред. А. С. Предводителя, 29. Изд. «Наука», М., 1963.
- [9] О. Б. Фирсов, М. И. Чибисов. ЖЭТФ, 39, 1770, 1960.
- [10] R. L. Taylor, G. Caledonia. IQSRT, 9, 681, 1969.
- [11] T. Wentink, W. Planet, P. Hammerling, B. Kivel. J. Appl. Phys., 29, 742, 1958; русский перевод в сб. «Ударные трубы», под ред. Х. А. Рахматулина и С. С. Семенова, 528. Изд. «Мир», М., 1962.
- [12] Е. М. Кудрявцев, Н. Н. Соболев, Л. Н. Туницкий, Ф. С. Файзуллов. Тр. ФИАН, 18, 159, 1962.
- [13] А. А. Коньков, А. П. Рязин, В. С. Руднев. IQSRT, 7, 339, 1967.
- [14] А. А. Коньков, А. В. Воронцов. Опт. и спектр. 32, 1972.
- [15] Ю. А. Пластинин. ПМТФ, № 2, 87, 1969.
- [16] А. С. Предводителей, Е. В. Ступоченко, Е. В. Самуйлов, И. П. Стаханов, А. С. Плешанов, И. Б. Рождественский. Таблицы термодинамических функций воздуха. Изд. АН СССР, М., 1957.
- [17] И. В. Авилова, Л. М. Биберман, В. С. Воробьев, В. М. Замалин, Г. А. Кобзев, А. Н. Лагарьков, А. Х. Мнацаканян, Г. Э. Норман. Оптические свойства горячего воздуха. Изд. «Наука», М., 1970.
- [18] В. Касьянов, А. Старостин. ЖЭТФ, 48, 295, 1965.

Поступило в Редакцию 20 ноября 1970 г.