Доклады Академии наук СССР
1978. Том 241, № 1

ФИЗИКА

Б. М. СМИРНОВ, Г. В. ШЛЯПНИКОВ

ПЕРЕНОС ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПОЛОСАХ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА И ВОДЯНОГО ПАРА

(Представлено академиком И. К. Кикоиным 26 XII 1977)

В работах авторов ([1–3]) разработан асимптотический метод расчета интенсивности инфракрасного излучения слоя молекулярного газа, неоднородного по температуре и плотности частиц. Основой этой теории является плавная зависимость температуры от точки пространства и медленное изменение интенсивности спектральных линий с частотой. Наличие указанных малых параметров позволяет определить характеристики излучения слоя газа: функцию пропускания, эквивалентную ширину молекулярной полосы, поток излучения, создаваемый слоем,— в полуаналитическом виде и с оцениваемой точностью. В данной работе рассмотрен более общий случай, когда на молекулярный спектр с плавно меняющейся интенсивностью линий наложен случайный спектр молекул другого газа. Расчеты выполнены для инфракрасного излучения смеси углекислого газа и водяного пара. Исследован эффект взаимного экранирования излучения, обусловленный перекрыванием спектральных линий CO_2 и H_2O в области длин волн 15 мкм и 9—10 мкм. Это позволяет сделать некоторые оценки влияния накопления углекислого газа в атмосфере Земли на ее климат.

1. Рассмотрим сначала общую задачу о нахождении излучательных характеристик смеси молекулярных газов при наличии перекрывания полос двух ее компонент. Пусть при этом полоса одной из компонент имеет регулярную структуру с плавно зависящей от частоты интенсивностью спектральных линий, а в полосе другой компоненты линии расположены хаотически и зависимость их интенсивности от частоты является скачкообразной. В данном случае удобно использовать случайную модель переноса инфракрасного излучения ([4, 5]). Для полосы с хаотическим расположением линий случайная модель применима в силу заложенных в нее физических предположений *. Использование этой модели для регулярной полосы требует отдельного пояснения.

Выполним следующую процедуру. На основе случайной модели найдем функцию пропускания в интервале частот, содержащем большое число линий регулярной полосы, но достаточно узком, так что их интенсивность можно считать одинаковой. Интегрируя затем по частоте, определим эквивалентную ширину регулярной полосы. В случае полос линейных молекул с лоренцовским контуром отдельной спектральной линии вычисленная таким образом эквивалентная ширина полосы не сильно отличается от результата точного расчета на основе регулярной модели ([2, 3]). Таким образом, случайная модель является хорошим приближением для регулярных полос с плавной зависимостью интенсивности спектральных линий от частоты, а следовательно, может быть использована и в случае пересечений двух полос различной структуры: регулярной полосы и полосы с хаотическим расположением линий. Вычисленная с помощью случай-

* Случайная модель основана на предположении о хаотичности расположения спектральных линий и независимости положения отдельной линии от положения остальных линий ([4, 5]).

ной модели эквивалентная ширина совокупности таких полос оказывается равной

$$W=\int\left(1-\exp\left[-2\sqrt{\frac{\beta(\omega)}{\pi}}-C(\omega)\right]\right)d\omega. \qquad (1)$$

Форму спектральной линии здесь считаем лоренцовской, а оптическую толщину слоя газа в центрах линий — большой.

Поясним физический смысл параметров в формуле (1). $\beta(\omega)$ представляет собой оптическую толщину слоя газа, создаваемую регулярной полосой в минимумах ее спектральных линий; при этом величина $2\sqrt{\beta(\omega)/\pi}$ равна отношению эквивалентной ширины линии к расстоянию между соседними линиями. Аналогичным образом величина $C(\omega)$ представляет собой среднее (усредненное по некоторому интервалу частот, содержащему достаточно большое число линий) отношение эквивалентной ширины линий случайной полосы к расстоянию между соседними линиями в этой полосе. Структура формулы (1), а именно тот факт, что показатель экспоненты содержит сумму $2\sqrt{\beta(\omega)/\pi}+C(\omega)$, отражает независимость расположения отдельной спектральной линии от положения остальных линий — предположение, заложенное в случайную модель полосы. Эквивалентная ширина линии лоренцовского контура пропорциональна корню квадратному из произведения ширины линии и плотности излучающих частиц. Поскольку в реальных условиях лоренцовская форма линий молекулярного спектра обусловлена ударным уширением, а ударная ширина линии пропорциональна плотности газа, величина $C(\omega)\sim\sqrt{NN_1}$ и $\beta(\omega)\sim NN_2$ (N_2, N_1 — плотности излучающих компонент газовой смеси, N — полная плотность частиц газа).

При медленном изменении температуры по слою газа создаваемый им на данной частоте поток излучения равен потоку излучения однородного газа ([2], [3]). Случайная модель дает следующее выражение для интегрального по частотам потока излучения плоского слоя газа:

$$I=2\int d\omega\, j_\omega(T_\omega)\int_0^1\cos\theta\left(1-\exp\left[-2\sqrt{\frac{\beta(\omega)}{\pi\cos\theta}}-\frac{C(\omega)}{\sqrt{\cos\theta}}\right]\right)d\cos\theta; \qquad (2)$$

здесь $j_\omega(T)$ — поток излучения абсолютного черного тела температуры T,

$$j_\omega(T)=\frac{\hbar\omega^3}{4\pi^2c^2}\left[e^{\hbar\omega/T}-1\right]^{-1},$$

θ — угол, под которым фотон выходит за пределы слоя газа, T_ω — эффективная температура. Модифицируя методику ее определения, развитую в ([2], [3]) применительно к рассматриваемой ситуации, получим формулы для высоты слоя газа, которой соответствует температура T_ω:

$$F(z_\omega)=\begin{cases}{}^1/_3-{}^1/_4\sqrt{\beta(\omega)/\pi}-{}^1/_8C(\omega), & \sqrt{\beta(\omega)}+{}^1/_2\sqrt{\pi}\,C(\omega)\ll 1,\\ \dfrac{\pi}{3(\sqrt{\beta(\omega)}+{}^1/_2\sqrt{\pi}\,C(\omega))^2}, & \sqrt{\beta(\omega)}+{}^1/_2\sqrt{\pi}\,C(\omega)\gg 1.\end{cases} \qquad (3)$$

Эффективная температура T_ω соответствует высоте слоя газа z_ω. Функция $F(z)$ характеризует изменение оптической толщины слоя по координате z и равна отношению оптической толщины от точки z до границы выхода излучения к оптической толщине всего слоя.

2. В области длин волн ~15 мкм спектральные линии деформационных колебаний молекулы CO_2 перекрываются с чисто вращательным спектром водяного пара, также состоящим из отдельных линий. В широком диапазоне плотностей газа, в частности при условиях нижней атмосферы

Земли, контур всех этих линий можно считать лоренцовским. Это нетрудно показать, сравнив эквивалентную ширину линий с характерной шириной области частот вблизи центра линии, в которой основную роль играет ударное уширение. Таким образом, смесь углекислого газа и водяного пара полностью соответствует рассмотренной общей задаче.

Иная ситуация имеет место в области частот 900—1100 см$^{-1}$. Здесь на спектральные линии лазерных переходов молекулы углекислого газа накладывается плавно меняющийся с частотой спектр водяного пара ([6]). При этом в области частот каждого из лазерных переходов коэффициент поглощения паров воды можно считать постоянным. Имея в виду дальнейшие приложения для атмосферы Земли, рассмотрим характерную для нее ситуацию, когда оптическая толщина, создаваемая углекислым газом, значительно меньше единицы в минимумах спектральных линий и больше единицы в максимумах спектральных линий. В этом случае интегральный поток инфракрасного излучения, создаваемый в области частот каждого из лазерных переходов, может быть получен из общих формул для потока излучения слоя газа ([7], [8]) на основе метода, развитого в ([9]), с последующим интегрированием по частоте.

3. Полученные результаты удобно использовать для оценки влияния накопления углекислого газа в атмосфере Земли на тепловой баланс планеты. Поскольку увеличение углекислого газа в атмосфере обусловлено производственной деятельностью человека, то проводимые далее оценки дадут представление о ее влиянии на климат Земли.

В настоящее время при сжигании горючих ископаемых в атмосферу ежегодно попадает 5 млрд т углерода в виде соединения CO_2. Согласно прогнозам ([10]), эта величина составит в 2000 г. 11 млрд т, а в 2025 г. 26 млрд т. Этот углерод частично окажется в составе углекислого газа атмосферы, а в большей степени попадет в состав биосферы на поверхности Земли. Концентрация углекислого газа в атмосфере в 1977 г. составляла $326 \cdot 10^{-6}$. Если углерод горючих ископаемых между атмосферой и биосферой и в дальнейшем будет распределяться в тех же пропорциях, что и теперь, то в 2000 г. концентрация углекислого газа в атмосфере составит $362 \cdot 10^{-6}$, а в 2025 г.— $450 \cdot 10^{-6}$ (т. е. увеличится к 2000 и 2025 гг. соответственно на 11 и 38%).

Имеются расхождения в способах определения изменения температуры поверхности Земли из-за загрязнения атмосферы. Мы используем следующий подход ([2]). Пусть ΔI — дополнительный поток инфракрасного излучения загрязненной атмосферы на поверхность Земли. Это приведет к изменению температуры поверхности Земли на величину ΔT и соответственно на величину $4\sigma T^3 \Delta T$ потока излучения, исходящего с поверхности Земли (σ — постоянная Стефана — Больцмана). Энергия, попадающая на поверхность Земли, частично (21%) идет на конвекцию и испарение, основная часть (79%) тратится на тепловое излучение поверхности Земли ([12], [13]). Считая, что на тепловое излучение Земли идет та же часть дополнительного потока энергии, что и основного, получим для изменения температуры поверхности Земли выражение

$$\Delta T = 0{,}195 \Delta I / (\sigma T^3). \qquad (4)$$

Оценим изменение температуры поверхности Земли при увеличении концентрации атмосферного углекислого газа $\delta[CO_2]$ на 10, 40 и 100% в зависимости от содержания в атмосфере водяного пара. Для этого используем модель стандартной атмосферы ([6], [14]). Результаты расчета изменения температуры поверхности Земли в зависимости от влажности воздуха m представлены в табл. 1.

Из анализа полученных данных мы приходим к следующим выводам. Увеличение температуры поверхности Земли из-за накопления в атмосфере Земли углекислого газа антропогенного происхождения составит на ру-

Таблица 1

Увеличение температуры поверхности Земли при возрастании концентрации CO_2 *

w, %	0			20			70			100		
$\delta[CO_2]$, %	10	40	100	10	40	100	10	40	100	10	40	100
$\Delta T'$, K	0,14	0,48	1,2	0,10	0,41	0,78	0,08	0,32	0,67	0,08	0,30	0,59
$\Delta T''$, K	0,04	0,14	0,35	0,04	0,14	0,35	0,03	0,12	0,23	0,02	0,10	0,19
ΔT, K	0,18	0,62	1,55	0,14	0,55	1,13	0,11	0,44	0,90	0,10	0,40	0,78

* Вклады в изменение температуры ΔT от полосы 15 мкм ($\Delta T'$) и лазерных переходов молекулы CO_2 ($\Delta T''$) разделены: $\Delta T = \Delta T' + \Delta T''$.

беже нашего столетия примерно 0,1°, через 50 лет — примерно 0,5° *. Это несколько завышенные цифры, ибо при их получении мы не учитывали наличия в атмосфере различных молекулярных примесей, аэрозоля, облаков, что уменьшает прозрачность атмосферы в той части спектра, где излучают молекулы углекислого газа, и тем самым снижает влияние углекислого газа на оптические свойства атмосферы. Полученные цифры заметно сходятся с прежними оценками ([15]), согласно которым изменение температуры Земли за счет накопления углекислого газа антропогенного происхождения к 2000 г. составит ~0,5 K. Это расхождение обусловлено в основном тремя причинами: во-первых, в прежних оценках сильно завышалась планируемая добыча горючих ископаемых; во-вторых, в них не учитывалось, что меньшая часть антропогенного углекислого газа останется в атмосфере; в-третьих, в них занижена роль водяного пара.

Представленная в данной работе схема нахождения излучательных характеристик газовой смеси, состоящей из двух молекулярных компонент, может быть распространена на случай нескольких компонент; она дает возможность надежно и относительно простым способом определять эти характеристики.

Институт атомной энергии
им. И. В. Курчатова
Москва

Поступило
23 XI 1977

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Б. М. Смирнов, Г. В. Шляпников,* Теплофиз. высоких температур, т. 14, 26 (1976). [2] *Б. М. Смирнов, Г. В. Шляпников,* Химия плазмы, т. 3, Атомиздат, 1976, стр. 130. [3] *Б. М. Смирнов, Г. В. Шляпников,* Оптика и спектроскопия, т. 42, 1070 (1977). [4] *R. M. Goody,* Quart. J. Roy. Meteor. Soc., v. 78, 165 (1952). [5] *G. N. Plass,* J. Opt. Soc. Am., v. 48, 690 (1958). [6] *Р. М. Гуди,* Атмосферная радиация, М., «Мир», 1966. [7] *Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер,* Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, М., «Наука», 1966. [8] *Б. М. Смирнов,* Физика слабоионизованного газа, М., «Наука», 1972. [9] *И. И. Остроухова, Г. В. Шляпников,* Теплофиз. высоких температур, т. 15, 744 (1977). [10] *R. M. Rotty,* Present and Future Production of CO_2 from Fossil Fuels, Inst. for Energy Analysis, Oak Ridge, 1977. [11] *Б. М. Смирнов,* Природа, № 3, 12 (1977). [12] *Н. А. Куликов, Н. С. Сидоренко,* Планета Земля, М., «Наука», 1972. [13] *И. Блютген,* География климатов, М., «Прогресс», 1972. [14] *К. Я. Кондратьев, Х. Ю. Нийлиск, Р. Ю. Ноорма,* В сб.: Радиационные исследования в атмосфере, Л., Гидрометеоиздат, 1972, стр. 275. [15] *S. Manabe,* Global Affects of Environmental Pollutions, Holand, Dordrecht, 1970, p. 218.

* Средняя влажность воздуха в соответствии с параметрами стандартной атмосферы ([14]) принимается равной 60%.