

УДК 528.28

В. В. КИРИЧУК, канд. техн. наук, Ф. Д. ЗАБЛОЦКИЙ, канд. техн. наук
Львовский политехнический институт

АСТРОНОМИЧЕСКАЯ РЕФРАКЦИЯ В АТМОСФЕРЕ ВЕНЕРЫ

Успехи в исследовании планет Солнечной системы, и в первую очередь Венеры и Марса, достигнутые благодаря применению автоматических межпланетных станций, позволяют решать целый ряд научных задач, в том числе задачу определения астро-

номических рефракций в атмосферах этих планет [2, 9]. Решение данной задачи обеспечивает относительно большой объем информации об атмосферах Венеры и Марса. Кроме того, в настоящее время определение астрономической рефракции становится актуальным вследствие возрастающей сложности и объема экспериментов, выполняемых в атмосферах и на поверхности этих планет новыми автоматическими станциями.

Астрономическую рефракцию можно рассчитать для произвольной атмосферы, зная:

а) строение атмосферы, т. е. среднюю температуру и парциальное давление всех газов, составляющих атмосферу, включая водяной пар, на любых высотах над поверхностью планеты;

б) состав атмосферы, т. е. процентное содержание каждого газа, входящего в атмосферу;

в) удельную рефракцию каждого газа, составляющего атмосферу.

Для расчета рефракции в атмосфере Венеры воспользуемся моделью ее атмосферы, построенной на основании исследований АМС * «Венера»-4, 5, 6, 7, 8 [3—6]. Обоснованность этой модели подтверждена исследованиями АМС «Венера»-9, 10 [1].

Модель атмосферы Венеры представлена в виде значений температуры, давления и плотности ее «воздуха» в интервале высот 6—1000 км относительно средней поверхности планеты (средний радиус 6050 км) [4].

Значения параметров атмосферы приведены через каждые 2 км до высоты 100 км, через 5 км — до 170 км, через 10 км — до 200 км, через 25 км — до 500 км, через 50 км — до 700 км и через 100 км — до 1000 км. В качестве наиболее достоверного участка авторы модели считали интервал высот 0—80 км. Поэтому в дальнейшем при практических вычислениях мы ограничимся участком модели атмосферы Венеры высотой до 100 км включительно.

Согласно той же модели [4], атмосфера Венеры состоит на 97% из углекислого газа, 2% азота и 1% водяного пара и других примесей. Однако поскольку содержание азота, водяного пара и других примесей определено в настоящее время с большими погрешностями [3], то условимся считать, что атмосфера Венеры состоит только из углекислого газа. Это позволит значительно упростить вычисление показателя преломления венерианского «воздуха». Так, известное уравнение Лоренц-Лорентца [7]

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \sum_i R_i \rho_i, \quad (1)$$

где R_i и ρ_i — удельная рефракция и парциальная плотность компонент газовой смеси, приводим в этом случае к уравнению

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = R_{\text{CO}_2} \cdot \rho_{\text{CO}_2}. \quad (2)$$

* Автоматическая межпланетная станция.

Решим уравнение (2) относительно показателя преломления n

$$n^2 = 1 + (n^2 + 2) \cdot R \cdot \rho^*, \quad (3)$$

или

$$n = [1 + (n^2 + 2) R \cdot \rho]^{1/2} = 1 + \frac{1}{2} (n^2 + 2) R \cdot \rho -$$

$$-\frac{1}{8} [(n^2 + 2) R \cdot \rho]^2 + \frac{3}{48} [(n^2 + 2) R \cdot \rho]^3 - \dots \quad (4)$$

Обозначим последние три члена разложения (4) через I, II и III и выполним их оценку для нескольких уровней в атмосфере Венеры. Результаты этих вычислений приведены в табл. 1.

Таблица 1
Оценка влияния членов II и III на показатель преломления

$H, \text{ км}$	n_H	$\rho_H (\text{г}/\text{см}^3)$	R	II	III
0	1,016	$6,73 \times 10^{-2}$	0,153	$122,0 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-6}$
10	1,009	$3,99 \times 10^{-2}$		$43,0 \times 10^{-6}$	$0,4 \times 10^{-6}$
20	1,005	$2,20 \times 10^{-2}$		$13,0 \times 10^{-6}$	$7,0 \times 10^{-8}$
35	1,002	$7,54 \times 10^{-3}$		$1,5 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-9}$

Приложение. Методика расчета удельной рефракции R и показателя преломления n_H описана ниже.

Из табл. 1 видно, что при точных расчетах астрономической рефракции в атмосфере Венеры погрешность определения показателя преломления не должна превышать $\pm 1 \times 10^{-6}$. В формуле (4) в зависимости от высоты слоя необходимо удерживать: 1) при $H \leq 10$ км все члены разложения; 2) при $10 \text{ км} \leq H \leq 35$ км член I-II; 3) при $H > 35$ км член I.

Таким образом, в отличие от вычислений рефракции в земной атмосфере, где используется известное соотношение Дэля-Гладстона

$$n = 1 + c\rho, \quad (5)$$

обеспечивающее необходимую точность **, для атмосферы Венеры, в зависимости от высоты слоев воздуха, показатель преломления следует определять так:

- для $H \leq 10$ км по формуле (4);
- для 10 км $\leq H \leq 35$ км по формуле

$$n = 1 + \frac{1}{2} (n^2 + 2) R \cdot \rho - \frac{1}{8} [(n^2 + 2) R \cdot \rho]^2; \quad (6)$$

* Индекс CO_2 опущен, поскольку все расчеты выполняются для атмосферы, состоящей только из углекислого газа.

** В формуле (5) $c = \text{const}$ принято для всей атмосферы [8].

в) для $H > 35$ км по формуле

$$n = 1 + \frac{1}{2} (n^2 + 2) R \cdot \rho. \quad (7)$$

В формулы (4), (6), (7) входит удельная рефракция R . Получим ее значение для углекислого газа, исходя из следующих соображений.

Согласно дисперсионной формуле, для показателя преломления углекислого газа при нормальных условиях ($t_0 = 15,16^\circ\text{C}$ и $P_0 = 1013,25$ мб) имеем [10]

$$(n_0 - 1) \times 10^8 = 22822,1 + 117,8 \sigma^2 + \frac{2406030}{(130 - \sigma^2)} + \frac{15997}{(38,9 - \sigma^2)}, \quad (8)$$

где $\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}$ — величина, обратно пропорциональная длине волны излучаемого света. Подставив в формулу (8) $\lambda = 0,550$ мк, что соответствует середине спектра видимого излучения, получим

$$n_0 = 1 + 42651,7 \times 10^{-8}. \quad (9)$$

Далее, из уравнения (2) для нормальных условий следует, что

$$R = \frac{n_0^2 - 1}{n_0^2 + 2} \cdot \frac{1}{\rho_0}. \quad (10)$$

Плотность углекислого газа при нормальных условиях найдем по известному соотношению (11)

$$\rho_0 = 529,37 \cdot \frac{P_0}{T_0} = 1860,9 \text{ г/м}^3, \quad (11)$$

а затем по формуле (10) получим значение удельной рефракции углекислого газа $R = 0,152789$.

Значение удельной рефракции, как известно [7], характеризуется поляризумостью среды и не зависит от давления и температуры. Следовательно, для данной среды (углекислого газа) найденное нами значение R является константой для всего возможного диапазона изменения плотности среды.

Поэтому запишем формулу (4) в следующем виде:

$$n = 1 + k\rho - k_1\rho^2 + k_2\rho^3, \quad (12)$$

где

$$\left. \begin{aligned} k &= 1/2(n^2 + 2) \cdot R; \\ k_1 &= 1/8 [\sqrt[2]{n^2 + 2} \cdot R]^2; \\ k_2 &= 3/48 [(n^2 + 2) \cdot R]^3. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

В дальнейшем для расчета показателя преломления будем пользоваться, учитывая также уравнения (7) и (13), формулой вида

$$n = 1 + k\rho. \quad (14)$$

Это оправдано как с точки зрения неполноты в данный момент информации о строении и составе атмосферы Венеры, так и с точки зрения вносимых в вычисления рефракций погрешностей за счет этих упрощений. Использование уравнения (14) вместо (12) вносит по приближенной оценке погрешность в значение рефракции в горизонте примерно $(-117'')$ при общем значении рефракции $\Theta \approx 5^\circ$.

Таблица 2

Зависимость коэффициента k от высоты

$H, \text{ км}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80
k	0,231590	0,230587	0,229956	0,229569	0,229389	0,229233	0,229200	0,229187	0,229184

Формула (14) внешне подобна уравнению Дэля-Гладстона (5), но в отличие от входящей в него константы c коэффициент k в формуле (14) будет изменяться с высотой. Это объясняется тем, что для атмосферы Венеры (нижних ее слоев) величина $(n-1)$ на два порядка больше, чем для атмосферы Земли и, следовательно, для величины k нельзя использовать, как в уравнении Дэля-Гладстона, приближенное равенство $k = \frac{1}{2}(n^2 + 2) \cdot R \approx 1,5 R$.

Чтобы установить зависимость коэффициента k от высоты, вычислим его значения для диапазона высот 0—100 км с помощью следующих соотношений:

$$n \approx 1 + 1,5 R \cdot \rho; \quad k = \frac{1}{2}(n^2 + 2) \cdot R. \quad (15)$$

Результаты вычислений приведены в табл. 2. Из нее следует, что зависимость коэффициента k от высоты необходимо учитывать вплоть до уровня 80 км при точном вычислении рефракции, т. е. при $\Delta n = \pm 1 \times 10^{-6}$, и лишь в более высоких слоях атмосферы можно полагать $k = 1,5 \cdot R = \text{const}$.

Рассмотрим теперь вычисление астрономической рефракции в атмосфере Венеры. Для этого представим с помощью уравнения (14) известный интеграл рефракции [12]

$$\theta = \int_{n_0}^1 \frac{dn}{n} \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{n(a+H)}{n_0 a} \right]^2 - \frac{1}{\sin^2 z} - 1}}$$

в виде

$$\theta = \int_{\rho_0}^{\rho_{100 \text{ км}}} \frac{k \cdot \sin z}{(1 + k\rho)^2} \cdot \frac{(1 + k_0 \rho_0)}{\left(1 + \frac{H}{a}\right)} \cdot \left[1 - \frac{(1 + k_0 \rho_0)^2 \sin^2 z}{(1 + k\rho)^2 \left(1 + \frac{H}{a}\right)^2} \right]^{-1/2} d\rho. \quad (16)$$

Интеграл (16) будем вычислять численным методом; для этого участок модели атмосферы Венеры в диапазоне высот 0—100 м разобьем на 50 двухкилометровых слоев и представим интеграл (16) в виде суммы интегралов

$$\theta = \sum_{i=0}^{49} \int_0^{2_{\text{км}}} \frac{k_i \cdot \sin z}{(1 + k_i \rho_i)^2} \cdot \frac{(1 + k_0 \rho_0)}{\left(1 + \frac{H_{0i} + h}{a}\right)} \times \\ \times \left[1 - \frac{(1 + k_0 \rho_0)^2 \sin^2 z}{(1 + k_i \rho_i)^2 \cdot \left(1 + \frac{H_{0i} + h}{a}\right)^2} \right] d\rho_i. \quad (17)$$

В каждом из этих слоев будем использовать линейную зависимость плотности от высоты

$$\rho_i = \rho_{0i} + b_i \cdot h, \quad (18)$$

где ρ_{0i} — плотность на нижней границе i -го слоя согласно модели атмосферы; b_i — коэффициент, предварительно рассчитываемый для каждого слоя по формуле

$$b_i = \frac{\rho_{0i+1} - \rho_{0i}}{2};$$

h — текущая высота внутри слоя.

Тогда с учетом уравнения (18) окончательно получим

$$\theta = \sum_{i=0}^{49} \int_0^{2_{\text{км}}} \frac{k_i b_i \sin z}{[1 + k_i (\rho_{0i} + b_i h)]^2} \cdot \frac{(1 + k_0 \rho_{00})}{\left(1 + \frac{H_{0i} + h}{a}\right)} \times \\ \times \left[1 - \frac{(1 + k_0 \rho_{00})^2 \sin^2 z}{[1 + k_i (\rho_{0i} + b_i h)]^2 \cdot \left[1 + \frac{H_{0i} + h}{a}\right]^2} \right]^{-1/2} dh, \quad (19)$$

где ρ_{00} — плотность «воздуха» у поверхности; k_0 — значение коэффициента k формулы (14) у поверхности; k_i — значение коэффициента k формулы (14) для середины i -го слоя, найденное по формулам (15); H_{0i} — высота нижней границы i -го слоя над поверхностью; a — средний радиус Венеры.

Значения θ (19) были вычислены на ЭВМ «М-222» для диапазона зенитных расстояний 0—80°. Причем исходными величинами являлись массивы чисел ρ_{0i} , b_i , k_i , H_{0i} ($i=0, \dots, 49$), а также k_0 , ρ_{00} и a . Эти данные предварительно выбирали и вычисляли согласно модели атмосферы Венеры [4]. Полученные значения астрономической рефракции по отдельным слоям и по всему 100-километровому участку модели атмосферы при-

ведены в табл. 3. Кроме того, из анализа данных табл. 3 следует, что для вычисления астрономической рефракции в атмосфере Венеры с точностью до $\pm 1''$ необходимо детально учитывать нижний 100-километровый слой атмосферы; влияние остальных слоев (от 100 км до 1000 км), очевидно, не превысит $\pm 1''$. Напомним, что для Земли аналогичная точность достигается при детальном учете лишь нижних 30 км атмосферы.

Таблица 3

Астрономическая рефракция в атмосфере Венеры при $t = 477^\circ\text{C}$,
 $P = 73038,8 \text{ мм. рт. ст.}$, $n_0 = 1,015586$, $\rho_0 = 6,73 \times 10^{-2} \text{ г/см}^3$

z	H, км			
	40	60	80	100
0°	00,0	00,0	00,0	00,0
5	258,5	277,2	279,0	279,0
10	521,0	558,7	562,4	562,5
15	791,8	849,2	854,9	855,0
20	1075,9	1153,8	1161,6	1161,7
25	1379,0	1478,9	1488,8	1489,0
30	1708,3	1832,1	1844,4	1844,6
32,5	1885,7	2022,4	2035,9	2036,2
35	2073,4	2223,7	2238,6	2238,9
37,5	2273,2	2438,0	2454,3	2454,6
40	2487,0	2667,4	2685,2	2685,6
45	2966,4	3181,7	3203,0	3203,4
47,5	3237,7	3472,8	3496,0	3496,5
50	3534,5	3791,2	3816,6	3817,1
52,5	3860,2	4140,8	4168,5	4169,0
55	4218,5	4525,4	4555,6	4556,0
57,5	4612,5	4948,2	4981,2	4981,9
60	5053,1	5420,5	5456,6	5457,3
62,5	5543,1	5945,1	5984,6	5985,4
65	6077,6	6517,0	6560,0	6560,9
67,5	6657,6	7136,8	7183,7	7184,6
70	7321,6	7842,4	7893,3	7894,3
72,5	8080,0	8643,2	8698,2	8699,3
75	8937,5	9542,6	9601,7	9602,9
77,5	9939,4	10560,9	10623,1	10624,4
80	11200,4	11837,8	11904,1	11905,5

Выполненное исследование, естественно, не претендует на полное решение проблемы рефракции в атмосфере Венеры, а является лишь одной из первых попыток изучения этого вопроса.

Список литературы: 1. Авдуевский В. Н. Выдающийся успех советской космонавтики. — «Правда», 1976, 19. II. 2. Александров Ю. В. [и др.]. Условия проведения астрономических наблюдений с поверхности Марса. — «Вестник Харьковского ун-та», 1975, № 1, 29, 10. 3. Конашенок В. Н. [и др.]. Новое о Венере и Марсе. М., Гидрометиздат, 1970, с. 50. 4. Кузьмин А. Д., Маров М. Я. Физика планеты Венера. М., «Наука», 1974. 5. Маров М. Я. Модель атмосферы Венеры. — «Докл. АН СССР», 1971, 196, № 1. 6. Ма-

ров М. Я., Рябов О. Л. Модель атмосферы Венеры. Препринт ИМП, АН СССР, М., 1972, № 39. 7. Нефедьева А. И. Астрономическая рефракция, ч. 2. — «Изв. АОЭ», Казань. Изд-во Казанского ун-та, 1973, № 40. 8. Труды ЦНИИГАиК. М., Геодиздат, 1952, вып. 102. 9. Шашлов Г. Г. Аналитический расчет астрономической рефракции в атмосфере Марса. — «Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка», 1974, 6. 10. Edlen B. Metrologia, 1966, 2, 71. 11. Owens J. C. Optical refractive index of air: dependence on pressure, temperature and composition. — «Applied Optics», 1967, № 1, р. 51—59. 12. Sugawa C. On the numerical integration of astronomical refraction. — «Publs. Astron. Soc. Jap.», 1955, 7, № 4, р. 163—175.

Работа поступила 1 февраля 1977 года.
Рекомендована кафедрой теории математической обработки геодезических измерений Львовского политехнического института.