

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО СВЕТОРАССЕЯНИЯ ЧИСТЫХ ГАЗОВ

Р.С. Асатрян

ЗАО "Национальный институт метрологии" РА

Рассматривается метод исследования молекулярного светорассеяния чистых газов. Проведены экспериментальные исследования с целью определения с высокой точностью значений коэффициентов молекулярного светорассеяния чистых газов, в частности, воздуха и углекислого газа. Полученные экспериментальные результаты имеют весьма важное значение для проведения градуировочных и метрологических работ оптико-электронных приборов и систем, предназначенных для измерения оптических параметров приземной атмосферы. В настоящей работе дается описание разработанного нами метода измерений коэффициентов светорассеяния чистого воздуха и углекислого газа, а также необходимого для этой цели вспомогательного оборудования.

Измеренные с высокой точностью значения коэффициентов молекулярного светорассеяния чистых газов необходимы для проведения оптической градуировки и метрологической аттестации разработанной нами оптико-электронной системы "ПОМПА" - полевого оптико-метеорологического поста-автомата, предназначенного для экспериментальных исследований приземной атмосферы с целью оперативного измерения прозрачности атмосферы в области длин волн от 0,35 до 1,03 мкм и метеорологической дальности видимости при различных климатических условиях на расстоянии от 0,1 до 300 км.

Метеорологическая дальность видимости (S_m) является одним из основных оптико-физических параметров атмосферы, особенно при взлете и посадке летательных аппаратов. В этом аспекте большую роль приобретают оптико-физические измерения полей излучений аэрозольного и молекулярного рассеяния. Такие измерительные системы имеют важную роль не только в научных исследованиях физических свойств атмосферы, но и при применении авианавигации для оперативной оценки "оптической погоды" в атмосфере.

Ключевые слова: чистая газовая среда, коэффициент светорассеяния, градуировка приборов, углекислый газ, прозрачность атмосферы.

Введение. С целью проведения оптической градуировки, т.е. определения чувствительности разработанного оптико-электронного автоматического измерительного комплекса "ПОМПА", предназначенного для оперативного измерения прозрачности атмосферы в области длин волн от 0,35 до 1,03 мкм и метеорологической дальности видимости при различных климатических условиях на расстоянии от 0,1 до 300 км, важное значение имеет создание оптически чистых

газовых сред с эталонными значениями коэффициентов молекулярного светорассеяния.

Натурные измерения в атмосфере и, в частности, измерения прозрачности атмосферы и метеорологической дальности видимости на $\lambda=0,55$ мкм осуществляются с помощью аппаратуры с чувствительностью не хуже $3,4 \cdot 10^{-5} \text{ км}^{-1}/\text{мВ}$.

Метеорологическая дальность видимости (S_M) является одним из важнейших оптико-физических параметров атмосферы, особенно при взлете и посадке летательных аппаратов. Во многих аэропортах наиболее частыми погодными явлениями, понижающими дальность видимости, являются туман и снегопад. При этих погодных условиях обычно отмечаются незначительное поглощение и незначительные изменения показателя ослабления атмосферы при изменении длины волны. К другим погодным явлениям, которые могут существенно ухудшить видимость, относятся сильный дождь, дым, песок и пыль.

В пределах угла рассеяния примерно $40 \dots 45^\circ$ туман и снег характеризуются одинаковым отношением рассеяния к показателю ослабления атмосферы, поэтому этот угол удобен при использовании в измерителях прямого рассеяния.

Исходя из вышеизложенного, создание высокочувствительных оптико-электронных автоматических измерительных систем метеорологической дальности видимости, эксплуатируемых при любых климатических условиях, а также методов и вспомогательных технических средств по оптической градуировке созданных систем является актуальной научно-технической задачей.

1. Камера для испытаний. Для создания оптически чистых газовых сред с известными значениями коэффициента рассеяния (например, для чистого воздуха или углекислого газа), которые используются при оптической градуировке аппаратуры "ПОМПА", нами была разработана и изготовлена специальная установка [1-3], которая схематически показана на рисунке.

Основным блоком этой установки является измерительная камера (поз. 5,7 на рис.), представляющая собой герметичный объем, где создается чистая газовая среда (необходимой степени чистоты) и при градуировке устанавливается оптико-механический блок "ПОМПА" [4, 5].

Принцип работы установки состоит в откачке (необходимым количеством циклов) из камеры газовой среды, загрязненной механическими и химическими примесями, и последующем ее заполнении очищенным газом, прошедшим через аэрозольные и масляные фильтры с гарантированной эффективностью очистки. При создании необходимых условий в измерительной камере следует соблюдать следующие условия: контроль химического состава газа, контроль аэрозольного состава в камере и показателя рассеяния газа.

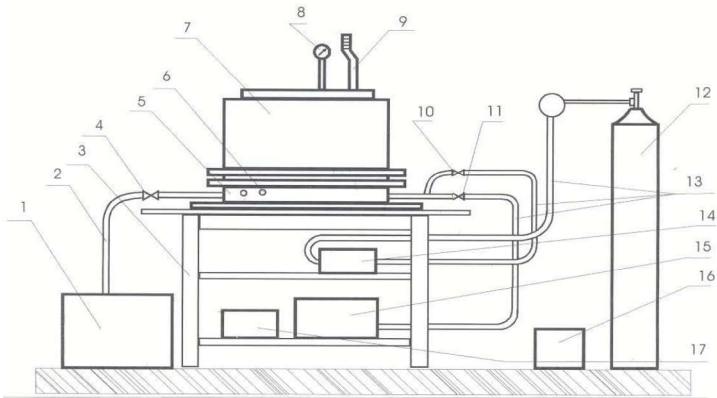


Рис. Схема установки оптической градуировки аппаратуры "ПОМПА":

1 - насос вакуумный ВН-461; 2 - труба вакуумная ШВ-30; 3 - установочный стол;
 4 - вентиль газовый БКБАМ-3; 5 - основание камеры; 6 - электрические разъемы СР-50
 (РСТВ-19 ВВТ-20БЦ); 7 - крышка камеры; 8 - вакуумметр ВО-160; 9 - термометр ТЛ-2;
 10 и 11 - вентили газовые; 12 - баллон газовый Е-400; 13 - трубка медицинская;
 14 - фильтр аэрозольный ГП-4; 15 - фотоэлектрический счетчик частиц АЗ-5;
 16 - пылесос "Урал" ПН-600; 17 - вольтметр В7-28

Коэффициент однородности химического состава газа $K_{X.C}$ обычно приводится в паспорте газового баллона. Эффективность очистки камеры после проведения N циклов откачки до давления P_{\min} (в наших экспериментах $P_{\min} = 0,5 \text{ атм.}$) выражается соотношением

$$X = \left[1 - \left(P_{\min} / P_0 \right)^N \right] \cdot K_{X.C}. \quad (1)$$

Количество продутого чистого воздуха через камеру, как определяющего фактора эффективности химической очистки камеры X , контролируется путем увеличения количества циклов откачки N до давления P_{\min} .

При замене газового состава камеры путем ее откачки в течение N циклов происходит одновременно и замена аэрозольного состава. Воздух из баллона проходит через аэрозольные и масляные фильтры. Эффективность очистки газа от крупнодисперсной пыли, масла и влаги, по паспортным данным фильтра РДФ-3, составляет 0,995. Эффективность очистки газа от аэрозольных частиц размерами от 0,3 до 0,6 мкм, по паспортным данным фильтра ГП-4, составляет 0,99995.

Эффективность очистки камеры от аэрозольных частиц, масла и влаги после проведения N циклов откачки до давления P_{\min} определяется по формуле

$$Y = \left[1 - \left(P_{\min} / P_0 \right)^N \right] \cdot \mathcal{E}_1 \cdot \mathcal{E}_2, \quad (2)$$

где $\mathcal{E}_1 = 0,995$; $\mathcal{E}_2 = 0,99995$.

Показатели молекулярного рассеяния в воздухе, по данным теории рассеяния Релея [6,7], приведены в табл. 1.

Эти показатели определяются молекулярным строением чистого воздуха (или других газов) и являются постоянными воспроизводимыми величинами. Поэтому чистые газы могут быть использованы в качестве эталонных сред с определенными коэффициентами светорассеяния. Представленные в табл. 1 значения α_0^M соответствуют условиям при $t_0 = 15^0 C$, $P_0 = 10 \cdot 10^4 Pa$ (760 мм рт. ст.), $\lambda_0 = 0,35; 0,55; 0,70; 1,1$ мкм. При определении показателя молекулярного рассеяния в условиях, отличных от t_0 , P_0 и λ_0 , необходимо вносить поправки по формуле

$$\alpha^M(\lambda, t, P) = \alpha_0^M(\lambda_0, t_0, P_0) \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^4 \cdot \frac{288}{273+t} \cdot \frac{P}{P_0}, \quad (3)$$

где λ, t, P - текущие значения этих же величин в условиях эксперимента.

Коэффициент рассеяния чистого воздуха с учетом всех вышеперечисленных поправок выражается соотношением

$$\alpha^M(\lambda, t, P) = \alpha_0^M(\lambda_0, t_0, P_0) \cdot \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^4 \cdot \frac{288}{273+t} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot [1 - (P_{\min} / P_0)^N] \cdot K_{x.c.} \cdot \mathcal{E}_1 \cdot \mathcal{E}_2. \quad (4)$$

Таблица 1

Показатель молекулярного рассеяния чистого воздуха		
Длина волны λ_0 , мкм	α_0^M , км ⁻¹	$\Delta\alpha_0^M$, %
0,35	0,07516	1,0
0,55	0,01162	1,0
0,70	0,00436	1,0
1,10	0,00076	1,0

С помощью формулы (4) нетрудно оценить относительную погрешность измерения коэффициентов светорассеяния чистых газов.

Для обеспечения точности оптической градуировки аппаратуры “ПОМПА” в процессе измерений контролируются: длина волны света в максимуме пропускания – по паспортным данным светофильтров с погрешностью $\Delta\lambda_0 \leq 0,001$ мкм, температура газа с помощью стеклянного термометра с погрешностью $\Delta t = \pm 0,5^0 C$, атмосферное давление с помощью барометра с погрешностью $\Delta P \leq 10$ мм рт. ст. Количество аэрозолей в камере контролируется счетчиком

частиц АЗ-5, для которого определяется фоновый сигнал в чистой атмосфере при аспирации воздуха через фильтр ГП-4.

Относительная погрешность молекулярного рассеяния определяется с учетом формулы (4) соотношением

$$\delta = \frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta\alpha_0}{\alpha_0} + \frac{4 \cdot \lambda_0^4 \cdot \Delta\lambda_0}{\lambda^5} \cdot \frac{288 \cdot \Delta t}{(273+t)^2} + \frac{\Delta P}{P \cdot P_0} + N(P_{\min})^{N-1} + \frac{\Delta P_{\min}}{P_{\min}} + \frac{\Delta K_{xc}}{K_{xc}} + \frac{\Delta \mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_1} + \frac{\Delta \mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_2}. \quad (5)$$

В силу постоянства величин \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 последние два члена в правой части формулы (5) равняются нулю. Анализ формул (4) и (5) показывает, что погрешность $\delta(\lambda, t, P)$ при контролировании вышеуказанных параметров определяется в основном погрешностью $\Delta\alpha_0(\lambda_0, t_0, P_0)$ и выражением $[1 - (P_{\min} / P_0)^N]$.

Эти два члена определяют соответственно основную и дополнительную погрешности в определении $\alpha(\lambda, t, P)$. Основная погрешность определения коэффициента молекулярного светорассеяния для воздуха (см. табл. 1) составляет 1%. Результирующая погрешность измерения $\delta(\lambda, t, P)$ с учетом всех контролируемых параметров составляет не более $\pm 5\%$.

2. Измерение коэффициентов рассеяния CO_2 . В качестве прикладного применения разработанной установки нами были проведены исследования показателя рассеяния чистого CO_2 . Камера заполнялась углекислым газом согласно методике, изложенной выше. С помощью предварительно отградуированного по воздуху прибора "ПОМПА" измерялась градуировочная постоянная А для углекислого газа. Измерения повторялись пять раз, т.е. после 5 - кратной замены углекислого газа в камере для каждой из четырех длин волн: $\lambda = 0,35; 0,55, 0,70; 1,1$ мкм. Отношение градуировочных постоянных $A_\lambda(CO_2)/A_\lambda(воз)$ оказалось равным от 2,58 до 2,64, соответственно, т.е. среднее значение $A_\lambda(CO_2)/A_\lambda(воз) = 2,61 \pm 0,03$.

С помощью полученного значения относительной величины градуировочных постоянных для углекислого газа и воздуха и соотношений (3.4), (3.7), представленных в [8], были рассчитаны коэффициенты молекулярного светорассеяния углекислого газа, результаты которых представлены в табл. 2.

В графах 3 и 4 табл. 2 приведены значения коэффициентов молекулярного рассеяния, измеренного нами и согласно [6].

Таблица 2

Измеренные и эталонные значения коэффициентов рассеяния углекислого газа				
ГАЗ	Длина волны λ_0 , мкм	α_0^M (изм.), км ⁻¹	α_0^M (этал.), км ⁻¹	$\Delta\alpha_0^M$, %
Углекислый газ	0,35	0,1962	0,1939	1,2
	0,55	0,0303	0,0304	0,3
	0,70	0,01138	0,01134	0,3
	1,10	0,0020	0,00196	2,0

Как видно из этих данных, максимальное отклонение измеренных $\alpha_0^M(\text{CO}_2)$ от эталонных значений составляет всего 2%.

Заключение. Основным результатом проведенных в настоящей работе исследований следует считать разработанную и изготовленную нами вспомогательную аппаратуру и методику измерений коэффициентов молекулярного рассеяния чистых газов, что крайне необходимо при проведении оптической градуировки оптико-электронной измерительной аппаратуры.

Литература

1. Установка оптической калибровки измерителя прозрачности атмосферы / **Р.С. Асатрян, С.Р. Асатрян, Г.Г. Геворкян и др.** // Приборы и техника эксперимента.- 2004.- №6.- С. 132-133.
2. **Asatryan R.** Measurer of the Atmosphere's Spectral Transparency, Inter. // Jour. Of Eng. Tech. and Manag.- 2015.- Vol. 2, iss. 4.- P. 62-63.
3. **Асатрян Р.С., Асатрян С.Р., Хачатрян Н.Р., Сукоян Л.А.** Оптико-электронный автоматический измеритель метеорологической дальности видимости // Авиакосмическое приборостроение.- 2010.- №6.- С. 39-52.
4. **Asatryan R., Karayan H., Khachatryan N.** Measurer of Meteorological Distance Visibility on the Horizontal Routes of the Ground Atmosphere // Intern. Journ. of Eng. Busi. And Manag.- 2017.- Vol. 1, iss. 1.- P. 43-44.
5. **Asatryan R., Karayan H., Khachatryan N.** Electronic Systems for Ecological Monitoring of Environment // Intern. Journ. of Eng. Scie. Techn. and Reas.- 2016.- Vol. 1, iss. 1.- P. 39-46.
6. **Ельяшевич М.А.** Атомная и молекулярная спектроскопия. Молекулярная спектроскопия. - М.: Либроком, 2009.- 528 с.
7. http://www.vrazvedka.ru/main/learning/voproso-ob/sharonov_0,3html. Наблюдение и видимость.
8. **Асатрян Р.С.** Оптико-электронные методы и приборы исследования приземной атмосферы и источников инфракрасного излучения: Дис. ... докт. техн. наук / ГИУА.- Ереван, 2013.- 226 с.

*Поступила в редакцию 18.06.2018.
Принята к опубликованию 14.12.2018.*

**ՄԱՔՈՒՐ ԳԱԶԵՐԻ ՄՈԼԵԿՈՒԼԱՅԻՆ ԼՈՒՍԱՅՐՄԱՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՄԻ
ՄԵԹՈԴԻ ՄԱՍԻՆ**

Ռ.Ս. Ասատրյան

Երկրամերձ մթնոլորտի օպտիկական պարամետրերի չափումների համար նախատեսված օպտիկա-էլեկտրոնային սարքերի և համակարգերի չափաբանական և աստիճանավորման աշխատանքների իրացման նպատակով կարևորագույն նշանակություն ունեն մաքուր գազերի, մասնավորապես, օդի և ածխաթթու գազի մոլեկուլային լուսացրման գործակիցների՝ բարձր ճշտությամբ փորձարարական հետազոտությունները: Աշխատանքը նվիրված է ածխաթթու գազի և մաքուր օդի լուսացրման գործակիցների չափման՝ մեր կողմից մշակված մեթոդի, ինչպես նաև այդ նպատակի համար անհրաժեշտ օժանդակ սարքավորման նկարագրությանը:

Մաքուր գազերի մոլեկուլային լուսացրման գործակիցների մեծ ճշտությամբ չափումները անհրաժեշտ են մեր կողմից մշակված դաշտային օպտիկա-օդերևութաբանական պոստ – ավտոմատի՝ երկրամերձ մթնոլորտի փորձարարական հետազոտությունների՝ (ԴՕՄՊԱ) անվամբ մեր կողմից մշակված օպտիկա – էլեկտրոնային համակարգի օպտիկական աստիճանավորման և չափաբանական ատեստավորման իրականացման համար, որը նախատեսված է նաև 0,35-ից մինչև 1,03 մկմ ալիքային երկարությունների տիրույթում մթնոլորտի թափանցիկության և 0,1 – 300 կմ տիրույթում օդերևութաբանական տեսանելիության հեռավորության օպերատիվ չափումների համար տարբեր եղանակային պայմանների դեպքում: Օդերևութաբանական տեսանելիության հեռավորությունը (S_m) մթնոլորտի կարևորագույն օպտիկա-ֆիզիկական պարամետրերից մեկն է, հատկապես, ինքնաթիռների թռիչքի և վայրէջքի ժամանակ:

Այս ուղղությամբ կարևորագույն դեր ունեն մոլեկուլյար և աերոզոլային մասնիկների ցրման ճառագայթման դաշտերի օպտիկա-ֆիզիկական չափումները: Այդպիսի չափողական համակարգերը ոչ միայն զգալի դեր են խաղում մթնոլորտի ֆիզիկական հատկությունների գիտական ուսումնասիրություններում, այլև կիրառվում են օդազնացության բնագավառում մթնոլորտում «օպտիկական եղանակի» օպերատիվ գնահատման համար:

Առանցքային բաներ. մաքուր գազային միջավայր, լուսացրման գործակից, սարքերի աստիճանավորում, ածխաթթու գազ, մթնոլորտի թափանցիկություն:

**A METHOD FOR INVESTIGATING THE MOLECULAR LIGHT SCATTERING OF
CLEAN GASES**

R.S. Asatryan

A method for investigating the molecular light scattering of clean gases is considered. Experimental studies for determining the coefficient of molecular light scattering of clean gases, in particular air and carbon dioxide, with high accuracy are carried out. The obtained results are very essential for realizing calibration and metrological operations of the optical-electronic devices and systems intended for measuring the optical parameters of the ground atmosphere. In

the present work, the description of the method for measuring the coefficients of light scattering of clean air and carbon dioxide, and also the required for this aim auxiliary equipment.

The accurately measured coefficient values of molecular scattering of clean gases are necessary for realizing the optical calibrating and metrological attestation of the optical-electronic system named Field Optical-Mechanical Post-Automat (FOMPA) intended for experimental researches of the ground atmosphere for the operative measurement of the atmosphere transparency in the wavelength range of 0,35-1,03 μ , and the meteorological distance visibility in different climatic conditions from 0,1 to 300 *km*.

The meteorological distance visibility (S_m) is one of the major optical-physical parameters of atmosphere, especially at the take-off and landing of aircrafts. In this respect, the optical-physical measurements of radiation fields caused by molecular and aerosol dispersion have an important role. Such measuring systems play a very important role not only in scientific researches of the physical properties of the atmosphere, but also at being applied in the field of air navigation for an operative estimation of "Optical weather" of the atmosphere.

Keywords: clean gas environment, coefficient of light scattering, calibrating of devices, carbon dioxide, transparency of atmosphere.