

К РАЗРАБОТКЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ СРЕДЫ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИССЛЕДОВАНИЮ ПРОПУСКАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ АЭРОЗОЛЬНЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ

Рожнёва О.В.

Научный руководитель: Шефер О.В.
Томский политехнический университет
634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, 30
Email: include@tpu.ru

Введение

Различного рода природные и технологические процессы активно влияют на процессы, происходящие в атмосфере. Объектом внимания являются выбросы как естественного, так и антропогенного происхождения [1, 2]. Контролю над аэрозольными загрязнениями, влияющими на здоровье людей и окружающую среду, придают большое значение во многих странах. Оптические методы с применением как наземных, так и аэрокосмических средств, считаются одними из наиболее эффективных методов в изучении атмосферных образований. Определение пропускания оптического излучения полидисперсными средами связано с решением многих задач. К таким задачам относятся: разработка моделей климата, исследование радиационного баланса земля-атмосфера, изучение переноса излучения через атмосферные слои, исследование радиационного выхолаживания и парникового эффекта, дистанционное наблюдение за объектами, анализ данных пассивного и лазерного зондирования водных и атмосферных сред при использовании наземных и космических средств [3, 4].

Численное представление процесса прохождения излучения через полидисперсные среды связано с выполнением трудоемких расчетов. В данной работе рассматриваются основные характеристики модели среды, которые необходимо учитывать при численной имитации пропускания оптического излучения слоистой средой.

Формализм расчетов

Для численного исследования свойств трансформированного излучения, прошедшего через слоистую среду, прежде всего, следует разработать модель отдельной частицы, позволяющую адекватно установить зависимость характеристик светорассеяния от параметров падающего излучения и параметров рассеивателя. Представление моделируемого процесса светорассеяния зависит от формы, размеров и оптических свойств частицы. Решение Ми [5] задачи рассеяния плоской волны на сфере является универсальной. Этот формализм может быть использован при моделировании сред, состоящих как из мелких, так и из крупных частиц, причем их форма может быть не только близкой к сферической, но иметь сложные объемные очертания.

В качестве отдельной частицы рассмотрим частицу сферической формы. Ее размер представляется радиусом a . Комплексный показатель преломления $\tilde{n} = n + i\chi$ характеризует оптические свойства частицы, где n определяет преломление, а χ — поглощение частицы.

Формула для расчета ослабления получена на основе оптической теоремы, которая использует интерференционный подход в определении экстинкции, а именно, экстинкция есть интерференция между падающим и рассеянным, в направлении вперед, излучением. В случае скалярных или неполяризованных полей сечение ослабления может быть представлено как

$$S_{\text{ext}} = \frac{4 \cdot \pi}{k^2} \text{Re}(S(0)),$$

где k — волновое число. Амплитудная матрица S размерностью 2×2 при угле рассеяния $\theta=0$ преобразуется в скалярную величину, то есть $S_{ij}=S(0)$. Сечение экстинкции в решении Ми вычисляется по формуле

$$S_{\text{ext}} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n)$$

где $k = 2\pi/\lambda$, а коэффициенты a_n, b_n определяются через функции Рикки – Бесселя. Их величины зависят от значений показателя преломления $\tilde{n}$, угла рассеяния, размера частицы R , длины волны падающего излучения λ . Для тестирования расчетных данных требуется выполнение закона сохранения энергии

$$S_{\text{ext}} = S_{\text{sca}} + S_{\text{abs}},$$

где S_{sca} — сечение рассеяния, S_{abs} — сечение поглощения.

Решение Ми для расчета ослабления, кроме условия $R \approx \lambda$, включает в себя и предельные случаи, когда $R \ll \lambda$ и $R \gg \lambda$. Так, для мелких частиц, когда их размеры много меньше длины волны падающего излучения λ , такое рассеяние называют рэлеевским. Если преобладающую роль в экстинкции играет поглощение, то спектр экстинкции меняется как $1/\lambda$, если же доминирует рассеяние, то спектр экстинкции ведет себя как $1/\lambda^4$ и с уменьшением длины волны ослабление увеличивается. В случае, когда размеры частиц много больше длины волны, значение сечения ослабления определяется как $S_{\text{ext}} = 2 \cdot S_{\text{sq}}$. Здесь S_{sq} — площадь геометрической тени частицы в направлении

распространения излучения. Из потока изымается в два раза больше излучения, чем падает на частицу. Ослабление крупной полупрозрачной частицей сферической формы не зависит от оптических свойств рассеивателя.

Известно, что при определении рассеянного поля в направлении вперед, в случае, когда размер частицы одного порядка с длиной волны падающего излучения, важно учитывать краевой эффект. Под «краем» понимают кривую раздела освещенной и неосвещенной частей частицы. Почти касательные лучи, которые отражаются в направлении, близком к направлению вперед, порождают краевой эффект. Вклад краевого эффекта в ослабление сферической частицей может быть определен из соотношения [6]

$$\Delta S_{\text{sp_edge_eff}} = \frac{1.992\,386}{\chi^{2/3}} S_{\text{sq}}.$$

Очевидно, что при увеличении размерного параметра χ , влияние краевого эффекта снижается.

Моделирование процесса ослабления излучения дисперсной средой обязывает рассматривать коэффициент ослабления. Наиболее простой переход от ослабления одной частицей к ослаблению системой частиц может быть проведен как

$$\alpha_{\text{ext}} = N \cdot \langle S_{\text{ext}} \rangle,$$

где N — концентрация частиц в единице объема, а $\langle S_{\text{ext}} \rangle$ — сечение ослабления, усредненное по ансамблю частиц.

С учетом функции распределения частиц по размерам коэффициент ослабления α_{ext} может быть представлен в интегральной форме, подынтегральная функция которого содержит в качестве множителя сечение ослабления излучения той или иной формы:

$$\alpha_{\text{ext}} = \int_a S_{\text{ext}}(a) \cdot N(a) da,$$

где $N(a)$ — функция распределения частиц по размерам.

При рассмотрении слоистой среды, в состав которой входят частицы различных форм и фракций (пусть количество видов частиц будет m), общий коэффициент ослабления определяется как

$$\alpha_{\text{ext}} = \sum_{i=1}^m \alpha_{\text{ext}}^i,$$

где α_{ext}^i — коэффициент ослабления совокупностью частиц, характеризующихся соответствующим видом (i -ой) формы.

Для расчета функции пропускания среды, содержащей аэрозольные частицы, воспользуемся следующей формулой

$$T = \frac{I_t}{I_1} = \exp(-\alpha_{\text{ext}} \cdot h),$$

где I_t — интенсивность прошедшего излучения, I_1 — интенсивность падающего излучения, h — путь, который проходит излучение в слое.

При изучении тонкой структуры оптических характеристик атмосферных образований важно учитывать особенности трансформации излучения. В зависимости от исследуемого объекта пренебрежение несферичностью при расчете ослабления может привести к различного рода ошибкам. Несферичность частиц, хаотически ориентированных в пространстве, может быть учтена при использовании «концепции эквивалентных объемов частицы и соответствующего шара» с последующим применением коррекционного коэффициента и решения Ми.

Заключение

Для изучения особенностей ослабления лучистой энергии следует рассмотреть модель среды, адекватную исследуемому образованию. Вклад той или иной особенности ослабления может существенно меняться в зависимости от исследуемого образования. Учет несферичности частиц, параметров распределения частиц по размерам и их оптических свойств является необходимым при изучении ослабления полидисперсными средами, в состав которых входят частицы различных размеров и форм.

Литература

1. Войцеховская О.К., Голубь И.В., Запругаев А.Ю., Шефер О.В. Влияние микрофизических параметров аэрозольных частиц в атмосфере на ослабление излучения ИК диапазона // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, Москва: МАИК-НАУКА, 2010. Т. 46. №1. С. 63-68.
2. Shefer O.V., Popov A.A. Extinction and small angle scattering by thin plate crystals // J. Applied Optics. 2010. V.49. N 8. P.1434-1445.
3. Войцеховская О.К., Шефер О.В., Каширский Д.Е., Харапудченко Е.А. Влияние аэрозольной сажевой компоненты на функцию пропускания выхлопов двигателей // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 9/2. С. 46-48.
4. Shefer O. Numerical study of extinction of visible and infrared radiation transformed by preferentially oriented plate crystals // J. Quant. Spectr. Rad. Trans. 2013. V.117. P.104-113.
5. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами.: М. Мир. 1986. 660 с.
6. P. Yang, L. Bi, B.A. Baum, K-N. Liou, G.W. Kattawar, M.I. Mishchenko, and B. Cole, "Spectrally Consistent Scattering, Absorption, and Polarization Properties of Atmospheric Ice Crystals at Wavelengths from 0.2 to 100 μm ," J. of the Atm. Sciences, vol. 70, pp. 330- 347, 2013.

Работа выполнена за счет средств субсидии в рамках реализации Программы повышения конкурентоспособности ТПУ.