

УДК 535.36

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ СЛОИСТОЙ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ

Б.В. Горячев, С.Б. Могильницкий

Томский политехнический университет
E-mail: msb@tpu.ru

Рассмотрен перенос излучения в трехслойной дисперсной среде с отражающей поверхностью. Получены аналитические выражения для определения величины отражательной способности и коэффициента пропускания дисперсной среды, состоящей из трех плоских слоев, ограниченных отражающей поверхностью. Показано, что стратосферный и приземный слои атмосферы даже при малой величине оптической плотности и ее слабом изменении оказывают существенное влияние на отражательную способность системы «трехслойная среда–отражающая поверхность» при всех значениях коэффициента отражения подстилающей поверхности. Установлено, что увеличение степени вытянутости индикатрисы рассеяния излучения в слое облачности приводит к уменьшению отражательной способности всей дисперсной среды; действие этого эффекта аналогично уменьшению оптической плотности облачного слоя атмосферы.

Ключевые слова:

Радиация, атмосфера, дисперсная среда, слой, отражающая поверхность.

Key words:

Radiation, atmosphere, dispersion media, layer, reflective surface.

Исследование отражательной способности и коэффициентов пропускания дисперсных сред проводится на основе методов теории переноса излучения и численных методов [1]. При проведении исследований используются различные модели атмосферы с подстилающей поверхностью [2–4]. Точность получаемых результатов зависит от точности используемых приближений и учета всех эффектов, существенно влияющих на результат, например эффекта пространственной ограниченности дисперсной среды [5–8].

Целью данной работы является решение задачи переноса излучения в аналитическом виде и определение некоторых закономерностей переноса в системе «трехслойная дисперсная среда–отражающая поверхность». Решение получено с использованием метода многократных отражений [5]. Дисперсная среда представляется в виде прямоугольного параллелепипеда, разделенного на три слоя, где отражающей является поверхность на задней грани (по направлению распространения излучения), при нормальном падении потока излучения на поверхность дисперсной среды. Получены аналитические выражения для определения коэффициента пропускания $A_{123}(\tau, a, \Lambda)$ и отражательной способности $B_{123}(\tau, a, \Lambda)$ слоистой дисперсной среды с отражающей поверхностью.

Введем обозначения: оптические размеры $\tau = \alpha l$ (α – коэффициент ослабления, l – геометрические размеры дисперсной среды) первого слоя параллелепипеда $\tau_{1x_0} \times \tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0}$ (излучение распространяется по оси x , поперечные оптические размеры одинаковы для всех слоев и равны $\tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0}$), второго слоя $\tau_{2x_0} \times \tau_{2y_0} \times \tau_{2z_0}$; третьего слоя $\tau_{3x_0} \times \tau_{3y_0} \times \tau_{3z_0}$; индикатриса рассеяния излучения, характеризующая степень вытянутости $a = (\eta + 2\mu) / (\beta + 2\mu)$, η , β , μ – интегральные параметры индикатрисы рассеяния [5, 7]; вероятность выживания кванта в первом слое Λ_1 , во втором – Λ_2 , в третьем – Λ_3 ; коэффициент отражения поверхности r , пропускания t . В данной модели дисперсной среды, используемой для расчета радиационных характеристик атмосферы, первый слой представляется в виде стратосферного слоя с релеевской индикатрисой рассеяния излучения, второй – слой облачности, индикатрисы рассеяния излучения которого зависят от типа облаков [9], третий слой – приземный аэрозоль, индикатрисы рассеяния которого также весьма разнообразны [4] и изменяются от релеевской до резко вытянутой [9]. Коэффициент отражения подстилающей поверхности изменяется от 0 до 1. На основе метода многократных отражений получены формулы:

$$A_{123} = \frac{tA_1A_2A_3F_2}{F_1F_2F_5 - r(A_1^2B_2F_5 + F_6)};$$

$$B_{123} = \frac{B_1F_2 + A_1^2B_2 + F_6/F_5}{F_2} + \frac{r(A_1A_2A_3)^2F_2}{F_5\{F_2F_5 - r[F_5(B_1F_2 + A_1^2B_2) + F_6]\}}.$$

Обозначения:

$$F_1 = 1 - rB_1(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda);$$

$$F_2 = 1 - B_1(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)B_2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda);$$

$$F_3 = 1 - B_1(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)B_3(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda);$$

$$F_4 = A_1^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)B_2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)B_3(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda);$$

$$F_5 = F_2F_3 - F_4;$$

$$F_6 = A_1^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)A_2^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)B_3(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda).$$

Радиационные характеристики каждого из слоев $A_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$, $B_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$, где $i=1,2,3$, определяются следующим образом [5]:

$$A_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) = \frac{[1 - R_i^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)] \exp[-k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)\tau_{ix_0}]}{1 - R_i^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \exp[-2k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)\tau_{ix_0}]},$$

$$B_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) = \frac{R_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \{1 - \exp[-2k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)\tau_{ix_0}]\}}{1 - R_i^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \exp[-2k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)\tau_{ix_0}]}.$$

Переменные коэффициенты $k(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$ и $R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$, зависящие от поперечных оптических размеров дисперсной среды, индикатрисы рассеяния излучения и вероятности выживания кванта, разные для каждого слоя и имеют вид:

$$k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) = \sqrt{P_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)[1 - \Lambda_i(\eta - \beta_i \Lambda)]};$$

$$R_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) = \frac{k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) - P_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)}{k_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) + P_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)}.$$

Функция $P(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$ определяет рассеяние и поглощение излучения по оси x и в частном случае релеевской индикатрисы рассеяния и полубесконечной среды [5]:

$$P(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) = \frac{(1 - \Lambda)(32 - 23\Lambda + 4\Lambda^2)}{2(16 - 17\Lambda + 4\Lambda^2)}.$$

Рассмотрим некоторые результаты расчетов по данным формулам потоков монохроматического излучения в слоистой дисперсной среде с отражающей поверхностью.

Результаты расчетов приведены на рис. 1–3. Поперечные оптические размеры дисперсной среды равны $\tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0} = 10^5$. На рис. 1 представлены зависимости отражающей способности B_{123} системы «трехслойная дисперсная среда–отражающая поверхность» от коэффициента отражения подстилающей поверхности, при различных значениях оптической плотности приземного и стратосферного слоев.

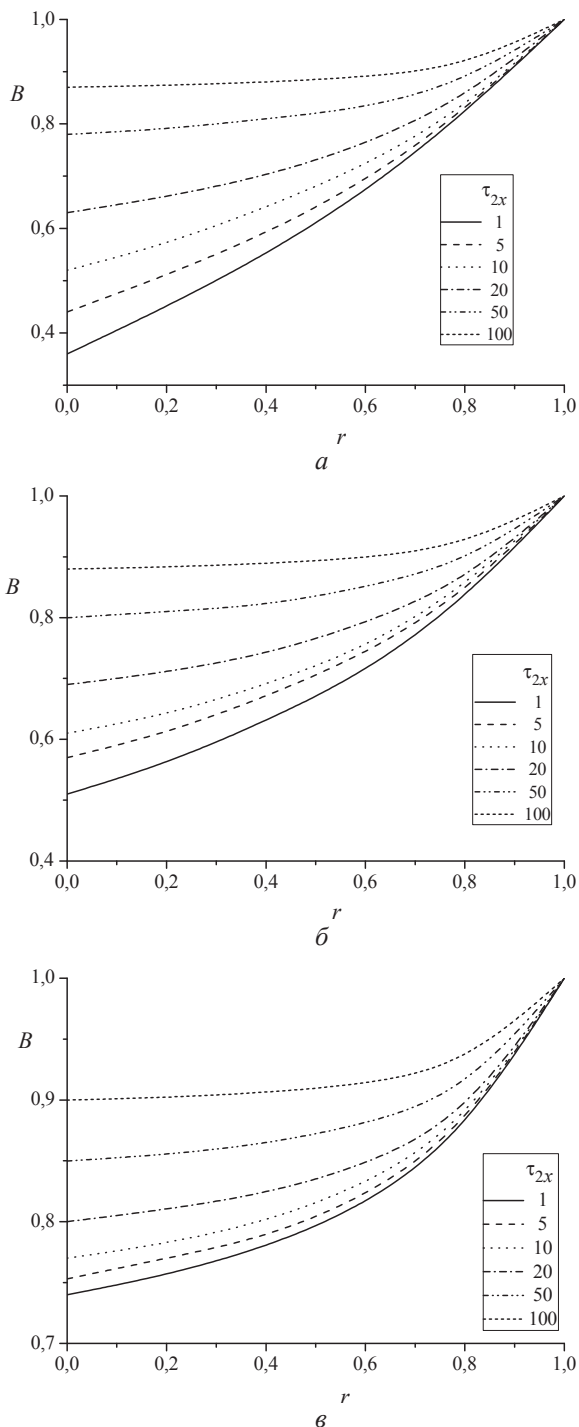


Рис. 1. Зависимость отражательной способности B_{123} системы «трехслойная дисперсная среда–отражающая поверхность» от коэффициента отражения подстилающей поверхности r , вероятность выживания кванта $\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_3 = 1$, степень вытянутости индикатрисы рассеяния излучения $a_1 = 1$; $a_2 = 15,7$; $a_3 = 1$, а) оптическая плотность приземного и стратосферного слоев $\tau_{1y_0} = \tau_{3y_0} = 0,5$; б) $\tau_{1y_0} = \tau_{3y_0} = 1$; в) $\tau_{1y_0} = \tau_{3y_0} = 5$

Представленные на рис. 1 данные показывают, что величина уходящей радиации сильно зависит от коэффициента отражения подстилающей поверхности при небольшой величине оптической

плотности облачного слоя атмосферы, и практически не зависит при $\tau_{2x_0} > 50$. Влияние слоя облачности на отражение солнечной радиации существенно зависит от оптических характеристик стратосферного и приземного слоев атмосферы. Как видно из рисунка, даже небольшое присутствие аэрозоля приводит к значительному изменению отражательной способности всей атмосферы, причем наличие отражающей поверхности нивелирует этот эффект.

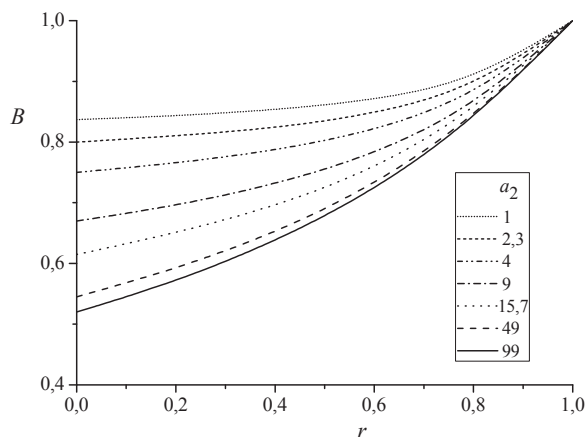


Рис. 2. Зависимость отражательной способности B_{123} системы «трехслойная дисперсная среда – отражающая поверхность» от коэффициента отражения подстилающей поверхности r , вероятность выживания кванта $\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_3 = 1$, оптическая плотность приземного и стратосферного слоев $\tau_{1x_0} = \tau_{3x_0} = 1$; оптическая плотность среднего слоя $\tau_{2x_0} = 10$

Рис. 2 иллюстрирует влияние индикатрисы рассеяния излучения на отражательную способность атмосферы. Из полученных данных следует, что зависимость отражательной способности атмосферы от величины коэффициента отражения подстилающей поверхности при различных типах облачности аналогична подобной зависимости при разных оптических плотностях слоя облачности.

На рис. 3 представлены результаты расчетов величины отражательной способности атмосферы при различных индикатрисах рассеяния излучения облачного слоя и коэффициентах отражения подстилающей поверхности. Значение степени вытянутости $a=1$ соответствует сферической или релеевской индикатрисе рассеяния, $a=100$ – резко вытянутой. В данном диапазоне изменения значений степени вытянутости индикатрисы рассеяния

излучения наблюдается значительное уменьшение отражательной способности атмосферы с ростом анизотропии индикатрисы рассеяния. Увеличение коэффициента отражения подстилающей поверхности нивелирует этот эффект.

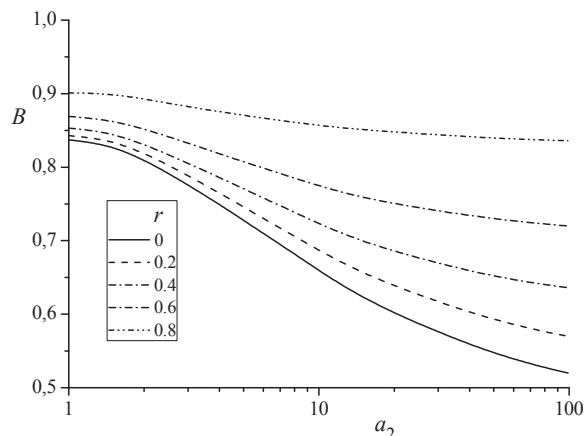


Рис. 3. Зависимость отражательной способности B_{123} системы «трехслойная дисперсная среда – отражающая поверхность» от степени вытянутости индикатрисы рассеяния излучения a_2 , вероятность выживания кванта $\Lambda_1 = \Lambda_2 = \Lambda_3 = 1$, оптическая плотность приземного и стратосферного слоев $\tau_{1x_0} = \tau_{3x_0} = 1$; оптическая плотность среднего слоя $\tau_{2x_0} = 10$

Выводы

1. Получены аналитические выражения для расчета коэффициента пропускания и отражательной способности трехслойной дисперсной среды с отражающей поверхностью.
2. Показано, что стратосферный и приземный слой атмосферы даже при малой величине оптической плотности или ее малом изменении оказывает существенное влияние на отражательную способность системы «трехслойная дисперсная среда – отражающая поверхность» независимо от величины коэффициента отражения подстилающей поверхности.
3. Установлено, что увеличение степени вытянутости индикатрисы рассеяния излучения в слое облачности приводит к уменьшению отражательной способности всей дисперсной среды и действие этого эффекта аналогично уменьшению оптической плотности облачного слоя атмосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 264 с.
2. Kokhanovsky A.A., Budak V.P., Cornet C., et al. Benchmark results in vector atmospheric radiative transfer // J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. – 2010. – V. 111. – P. 1931–1946.
3. Seidel F.C., Kokhanovsky A.A., Schaepman M.E. Fast and simple model for atmospheric radiative transfer // Atmos. Meas. Tech. Discuss. – 2010. – V. 3. – P. 2225–2273.
4. Панченко М.В., Козлов В.С., Полькин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П. Восстановление оптических

характеристик тропосферного аэрозоля Западной Сибири на основе обобщенной эмпирической модели, учитывающей поглощающие и гигроскопические свойства частиц // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25. – № 1. – С. 46–54.

5. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Некоторые особенности переноса излучения в пространственно ограниченных дисперсных средах // Известия Томского политехнического университета. – 2000. – Т. 303. – № 3. – С. 91–104.
6. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Исследование влияния размеров и формы рассеивающего объема на радиационные характеристики переноса излучения // Известия Томского поли-

- технического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 12–15.
7. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Влияние отражающей поверхности на радиационный баланс дисперсной среды // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 39–42.
8. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Перенос оптического излучения в слоистой дисперсной среде с отражающей поверхностью // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 2. – С. 78–81.
9. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 168 с.

Поступила 14.06.2013 г.

УДК 543.544.72

ХРОМАТОГРАФИЧЕСКАЯ СИСТЕМА С РАДИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

О.В. Жданев

Томский политехнический университет
Schlumberger Norge AS, г. Берген, Норвегия
E-mail: OZhdaneev@slb.com

Описан принцип хроматографической системы с радиальной геометрией. Предложенный вариант хроматографической колонки позволит упростить производство по сравнению с традиционными образцами колонок переменной геометрии и контролировать его наносить слой стационарной фазы.

Ключевые слова:

Хроматография, радиальная геометрия, оптимизация, дисперсия, моделирование.

Key words:

Chromatography, radial geometry, optimization, dispersion, modeling.

Введение

Работа посвящена развитию новых принципов и оборудования хроматографического анализа пластовых жидкостей.

Аналитическая хроматография была введена в лабораторную практику более века назад. При традиционном подходе [1] смесь компонент вводится в хроматографическую колонку (ХК) и за счет различной скорости перемещения компонент происходит их пространственное разделение для определения относительной концентрации компонент в анализируемой смеси. В классическом случае используются открытые капиллярные или набивные хроматографические колонки, в которых стационарная фаза (СФ) нанесена на стенки капиллярной колонки или на частицы, которыми наполнена колонка. Относительно недавно была разработана теория ХК модулированной геометрии, где за счет изменения радиуса ХК (для случая капиллярной ХК) или толщины СФ возможно значительно увеличить разрешающую способность хроматографической системы. Было показано [2, 3], что наиболее перспективными для целей разрешения компонент в смеси являются ХК с крутым профилем изменения радиуса ХК. Однако такой профиль ХК очень сложно изготовить и нанести контролируемый слой СФ.

С целью решения данных проблем в работе предлагается новый тип хроматографической колонки – ХК радиальной геометрии. С использованием ХК предложенной геометрии возможно не

только улучшить разрешение между интересующими компонентами смеси, но и существенно сократить время анализа, что является, порой, определяющим фактором при проведении внутрискважинных каротажных работ.

Предложенная в данной работе конфигурация ХК сочетает нелинейный профиль давления по длине колонки с возможностью изменения СФ, контактирующей с анализируемой смесью, проста в изготовлении и нанесении СФ с использованием микроэлектромеханических (MEMS) методов.

Хроматографическая система с использованием ХК радиальной геометрии будет состоять из следующих основных элементов:

- система ввода анализируемой смеси;
- непосредственно ХК;
- детектор или матрица детекторов;
- программное обеспечение для обработки сигнала с детектора, введения калибровочных поправок и взаимодействия с оператором.

На рис. 1 представлены варианты ХК радиальной геометрии с нанесением СФ на стенки колонки и набивной вариант ХК.

При использовании ХК с радиальной геометрией для анализа пластового флюида в режиме реального времени во внутрискважинном приборе или на поверхности небольшая часть жидкости для исследования подается в прибор. При проведении исследований пластового флюида непосредственно в скважине отбор пробы из пласта может быть произведен модульным динамическим пластоиспытателем.