

есть отношение времени пребывания простейшего эргодического контактного множества C в состоянии c_i к сумме математических ожиданий времён \bar{t}_i и $\bar{\tau}_{\neq c_i}$. Устанавливает их взаимосвязь следующая система:

$$\{\bar{t}_i = \bar{\tau}_{\neq c_i} p_i / (1 - p_i); \bar{\tau}_{\neq c_i} = \bar{t}_i (1 - p_i) / p_i\}.$$

Иначе, пуассоновский однородный поток фракций, переводящий контактное множество C не из конечного состояния c_i , является простейшим с интенсивностью λ_i . При этом интервал времени \bar{t}_i от любой точки на оси времени до ближайшего акта смены состояния пространства под действием простейшего потока фракций распределён по показательному закону с параметром, равным интенсивности этого потока: $\bar{t}_i = \lambda_i^{-1}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышкин Н.К., Кончиц В.В., Браунович М. Электрические контакты. – М.: Издательская группа URSS, 2008. – 560 с.
2. Лившиц П.С. Скользящий контакт электрических машин. – М.: Энергия, 1974. – 272 с.
3. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Логос, 2000. – 607 с.
4. Плохов И.В. Комплексная диагностика и прогнозирование технического состояния узлов скользящего токосъёма турбогенераторов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – СПб., 2001. – 36 с.
5. Слободян М.С., Слободян С.М. Модель динамики электрического контакта // Приборы и системы: управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 2. – С. 42–47.

Выводы

Определена статистическая марковская аналогия подобия динамического процесса разрушения щётчного элемента, скользящего по периодической ламельной структуре, процессу скольжения щётки на сплошной, бесконечной протяжённости, поверхности контактного кольца. Разработана аналитическая модель динамических случайных процессов в скользящем по поверхности периодической структуры – ламелям коллектора – щётчном контакте, учитывающая совокупное влияние случайных факторов в параметрах дискретного потока эмиссии фракций деструкции и позволяющая исследовать основные характеристики и оценивать состояние контактного узла токосъёма вероятностными методами и моделированием.

6. Слободян М.С., Слободян С.М. Деструкция тел скользящего контакта // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 2. – С. 20–25.
7. Деева В.С., Слободян С.М. Физическая модель разрушения скользящего токосъёма // Инженерная физика. – 2011. – № 6. – С. 32–37.
8. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и её инженерные приложения. – М.: Академия, 2009. – 384 с.

Поступила 18.01.2013 г.

УДК 535.36

ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В СЛОИСТОЙ ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЕ С ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Б.В. Горячев, С.Б. Могильницкий

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

Рассмотрен перенос излучения в двухслойной дисперсной среде с отражающей поверхностью. Получены аналитические выражения для определения характеристик радиационного баланса. Показано, что приземный слой атмосферы даже при малой величине оптической плотности и ее слабом изменении оказывает существенное влияние на отражательную способность системы «двухслойная среда – отражающая поверхность» при всех значениях коэффициента отражения подстилающей поверхности. Установлено, что увеличение оптической плотности приземного слоя атмосферы с поглощением приводит к почти полной независимости поглощательной способности системы «двухслойная среда – отражающая поверхность» от коэффициента отражения подстилающей поверхности.

Ключевые слова:

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

Key words:

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

Изучение радиационного баланса планетных атмосфер проводится на основе методов теории переноса излучения и численных методов [1, 2]. При проведении исследований используются различные модели атмосферы с подстилающей по-

верхностью [3–5]. Точность получаемых результатов зависит от точности используемых приближений и учета всех эффектов, существенно влияющих на результат, например эффекта пространственной ограниченности дисперсной среды [6, 7].

Целью данной работы является решение задачи переноса излучения в аналитическом виде и определение некоторых закономерностей переноса в системе «двухслойная дисперсная среда – отражающая поверхность». Решение получено с использованием метода многократных отражений [6, 8]. Дисперсная среда представляется в виде прямоугольного параллелепипеда, разделенного на два 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 характеристик радиационного баланса: коэффициента пропускания $A_{12}(\tau, a, \Lambda)$, отражательной $B_{12}(\tau, a, \Lambda)$ и поглощательной способности $C_{12}(\tau, a, \Lambda)$.

Введем обозначения: оптические размеры первого слоя параллелепипеда $\tau_{1x_0} \times \tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0}$ (излучение распространяется по оси x , поперечные оптические размеры одинаковы для обоих слоев и равны $\tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0}$), второго слоя $\tau_{2x_0} \times \tau_{2y_0} \times \tau_{2z_0}$; индикатриса рассеяния излучения, характеризующая степень вытянутости $a = (\eta + 2\mu) / (\beta + 2\mu)$, η , μ , β – интегральные параметры индикатрисы рассеяния [6, 7]; вероятность выживания кванта в первом слое Λ_1 , во втором – Λ_2 ; коэффициент отражения поверхности r , пропускания t . В данной модели первый слой представляется в виде слоя облачности с индикатрисой рассеяния излучения C_1 [9], второй слой – приземный аэрозоль, индикатрисы рассеяния которого весьма разнообразны. Коэффициент отражения подстилающей поверхности изменяется от 0 до 1. На основе метода многократных отражений получены формулы:

$$A_{12} = \frac{tA_1A_2}{F_1F_2 - rA_2^2B_1};$$

$$B_{12} = \frac{F_1(B_1 + B_2F_3) + rA_2^2F_3}{F_1F_2 - rA_2^2B_1};$$

$$C_{12} = \frac{F_1(C_1F_2 + A_1F_4) + rA_2(A_1F_5 - A_2B_1C_1)}{F_1F_2 - rA_2^2B_1}.$$

Обозначения:

$$F_1 = 1 - \frac{rR_2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \{1 - \exp[-2k_2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)\tau_{2x_0}]\}}{1 - R_2^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \exp[-2k_2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)\tau_{2x_0}]};$$

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

$$F_3 = \frac{\exp[-2k_1(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)\tau_{2x_0}] - R_1^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)}{1 - R_1^2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \exp[-2k_1(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)\tau_{2x_0}]};$$

$$F_4 = C_2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) + C_1(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)B_2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda);$$

$$F_5 = C_2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) + C_1(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)A_2(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda).$$

Радиационные характеристики каждого из слоев $A_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$, $B_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$, $C_i(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$, где $i=1, 2$, определяются следующим образом [6]:

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

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

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

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:

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

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

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

$$P(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) = \frac{(1 - \Lambda)(27 - 11\Lambda + \Lambda^2)}{3(9 - 7\Lambda + \Lambda^2)}.$$

Рассмотрим некоторые результаты расчетов потоков монохроматического излучения по данным формулам. Поперечные оптические размеры дисперсной среды равны $\tau_{1y_0} \times \tau_{1z_0} = 10^4$.

Представленные на рис. 1 данные показывают, что величина уходящей радиации сильно зависит от коэффициента отражения подстилающей поверхности при небольшой величине оптической плотности приземного слоя атмосферы и практически не зависит при $\tau_{2x_0} > 5$. Такая закономерность наблюдается при наличии верхнего (облачного) слоя атмосферы, причем этот эффект усиливается с возрастанием оптической плотности верхнего слоя так же, как в однородной среде [8].

На рис. 2 представлены результаты расчетов поглощательной способности C_{12} системы «двухслойная дисперсная среда – отражающая поверхность» при всех возможных значениях коэффициента отражения подстилающей поверхности. Наличие загрязнения в приземном слое атмосферы существенно влияет на поглощательную способность атмосферы в целом, но значительно сильнее сказывается оптическая плотность приземного слоя атмосферы. Следует отметить слабую зависимость поглощательной способности атмосферы от вида подстилающей поверхности в данных условиях, что объясняется наличием достаточно плотного верхнего слоя.

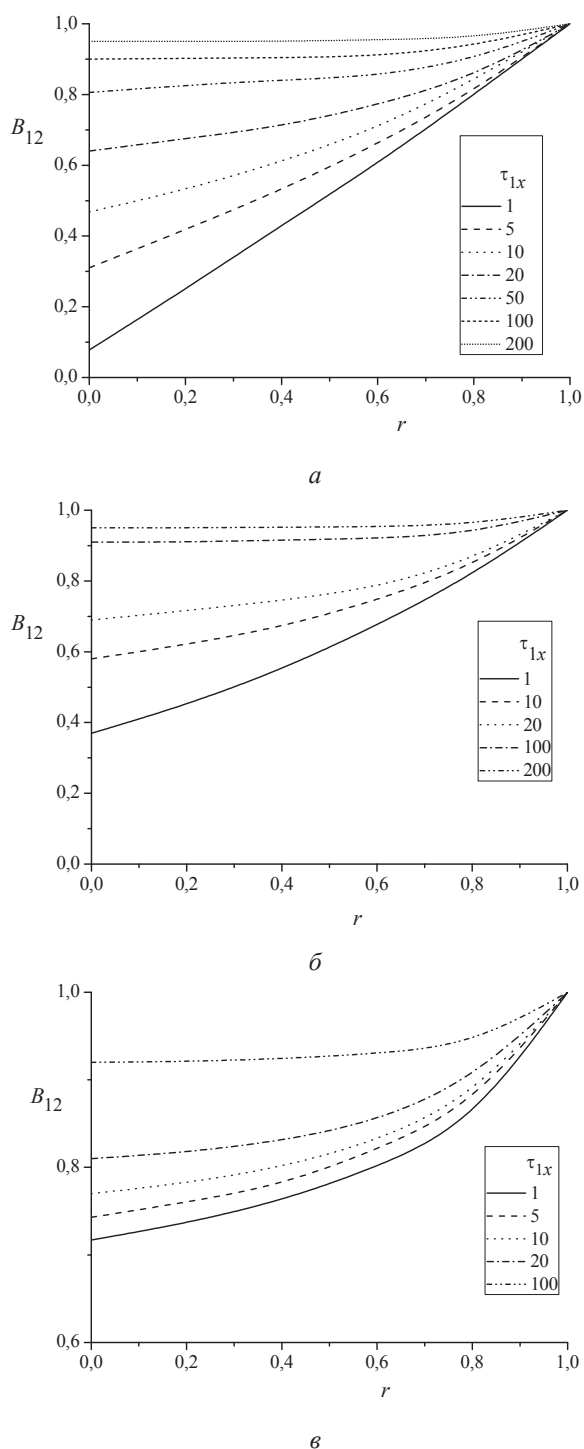


Рис. 1. Зависимость отражающей способности B_{12} системы «двухслойная дисперсная среда – отражающая поверхность» от коэффициента отражения подстилающей поверхности r , вероятность выживания кванта $\Lambda_1 = \Lambda_2 = 1$, степень вытянутости индикатрисы рассеяния излучения $a_1 = 10$; $a_2 = 1$: а) оптическая плотность приземного слоя $\tau_{2x0} = 0,1$; б) $\tau_{2x0} = 1,0$; в) $\tau_{2x0} = 5,0$

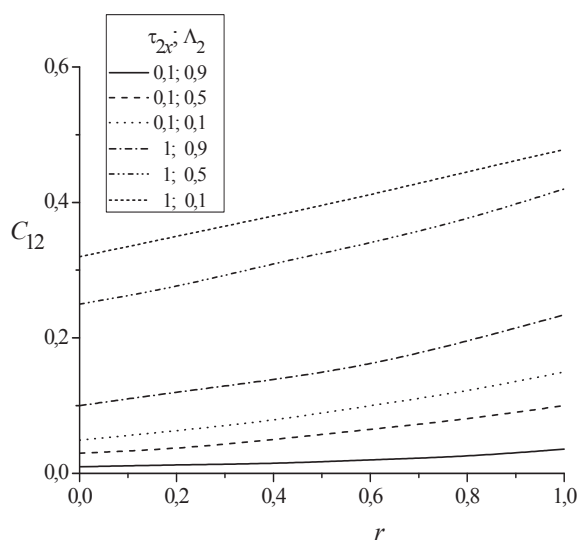


Рис. 2. Зависимость поглощательной способности C_{12} системы «двухслойная дисперсная среда – отражающая поверхность» от коэффициента отражения подстилающей поверхности r . Степень вытянутости индикатрисы рассеяния излучения $a_1 = 10$; $a_2 = 1$; оптическая плотность верхнего слоя $\tau_{1x0} = 10$

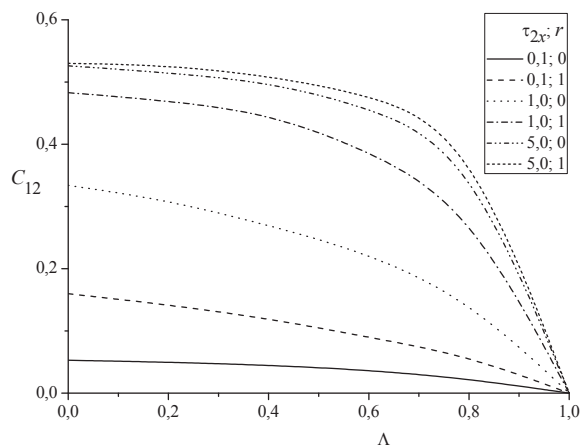


Рис. 3. Зависимость поглощательной способности C_{12} системы «двухслойная дисперсная среда – отражающая поверхность» от вероятности выживания кванта Λ . Степень вытянутости индикатрисы рассеяния излучения $a_1 = 10$; $a_2 = 1$; оптическая плотность верхнего слоя $\tau_{1x0} = 10$

На рис. 3 представлены результаты вычислений поглощательной способности C_{12} системы «двухслойная дисперсная среда – отражающая поверхность» в зависимости от степени загрязнения приземного слоя атмосферы. Все возможные значения поглощательной способности C_{12} атмосферы лежат между кривыми 1 и 2 при $\tau_{2x0} = 0,1$; 3 и 4 при $\tau_{2x0} = 1$; 5 и 6 при $\tau_{2x0} = 5$, причем с увеличением оптической плотности приземного слоя разрыв между кривыми практически исчезает.

Выводы

1. Получены аналитические выражения для описания радиационного баланса слоистой дисперсной среды с отражающей поверхностью: коэффициента пропускания, отражательной и поглощательной способности.
2. Показано, что приземный слой атмосферы даже при малой величине оптической плотности и/или ее малом изменении оказывает существенное влияние на отражательную способность системы «двухслойная дисперсная сре-

да – отражающая поверхность» независимо от коэффициента отражения подстилающей поверхности.

3. Изменение оптической плотности приземного слоя в большей степени влияет на отражательную способность системы, чем такое же изменение оптической плотности верхнего слоя при всех значениях коэффициента отражения подстилающей поверхности, а при оптической плотности свыше 5 практически не оказывает влияния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 264 с.
2. Зуев В.Е., Титов Г.А. Оптика атмосферы и климат. – Л.: Гидрометеоздат, 1996. – 256 с.
3. Jin Z., Charlock T.P., Rutledge K., Stamnes K., Wang Y. Analytical solution of radiative transfer in the coupled atmosphere ocean system with a rough surface // Appl. Opt. – 2006. – V. 45 (28). – P. 7443–7455.
4. 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.
5. Zhai P.W., Hu Y., Chowdhary J., Trepte C.R., Lucker P.L., Josset D.B. A vector radiative transfer model for coupled atmosphere and ocean systems with a rough interface // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2010. – V. 111. – P. 1025–1040.
6. 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.
7. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Исследование влияния размеров и формы рассеивающего объема на радиационные характеристики переноса излучения // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 12–15.
8. 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.
9. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 168 с.

Поступила 21.09.2012 г.

УДК 539.3

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С.А. Бочкарева*, Ю.А. Реутов

Томский политехнический университет

*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

E-mail: reutov@tpu.ru

Обозначена актуальность задачи оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопроводов из полимерных материалов численными методами. С использованием деформационно-прочностных свойств слоев произведен расчет трехслойной армированной полимерной трубы методом конечных элементов (МКЭ), получены графики распределения эквивалентных напряжений и перемещений. Приведено описание разработанного алгоритма численной реализации задачи и сравнение результатов работы программы с имеющимися аналитическими решениями. В качестве проверки достоверности результатов расчет повторен в программном комплексе ANSYS. Сделаны выводы о перспективности применения метода.

Ключевые слова:

Полимерные материалы, многослойные трубы, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, ANSYS.

Key words:

Polymer materials, multilayer pipes, stress-strain state, finite element method, ANSYS.

Основным средством транспорта углеводородов в наши дни являются трубопроводы, на долю которых приходится более 90 % перекачиваемых нефти и газа. Проверенным и общепризнанным материалом для изготовления трубопроводов служит сталь. Это обусловлено рядом важных качеств

материала: прочность, устойчивость к разрывному давлению, низкий коэффициент теплового расширения, практически абсолютная герметичность. Однако использование стальных труб сопровождается существенными недостатками, основными из которых являются: подверженность коррозии,