

УДК 535.36

ПЕРЕНОС ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ОБЛАЧНОЙ АТМОСФЕРЕ

Б.В. Горячев, С.Б. Могильницкий

Томский политехнический университет

E-mail: msb@tpu.ru

Исследовано влияние параметров облачности на радиационный баланс атмосферы. Предложен метод расчета величины радиационного взаимодействия при многократном переизлучении между облаками. Установлено, что максимальное радиационное взаимодействие наблюдается при определенных оптических размерах облаков и зависит от индикатрисы рассеяния излучения.

Ключевые слова:

Перенос излучения, разорванная облачность, рассеивающая среда, радиационное взаимодействие.

Key words:

Radiation transfer, broken clouds, scattering media, radiation interaction.

Расчет радиационных характеристик излучения, распространяющегося в разорванной облачности, обычно производится без учета взаимодействия между облаками [1–3]. Такое рассмотрение задачи возможно во многих случаях, но иногда ошибка в определении потоков излучения становится чрезмерно большой, и необходимость учета взаимодействия между облаками становится очевидной. Первым приближением расчета является рассмотрение взаимодействия между соседними облаками, причем в самом простом случае это взаимодействие рассматривается как однократное [2].

Взаимодействие между двумя соседними облаками определяется расстоянием между ними, размером, формой и взаимным расположением облаков, угловым распределением излучения (телом яркости), рассеянного каждым облаком. Все вышеперечисленные параметры являются стохастическими, поэтому задача построения алгоритма вычисления коэффициента взаимодействия между облаками является чрезвычайно сложной.

Одной из возможностей решения этой проблемы является использование метода многократных отражений [4], что позволяет определить радиационный баланс облачной атмосферы с учетом многократного оптического взаимодействия между соседними облаками.

Основные положения модели для построения методики вычисления коэффициента радиационного взаимодействия двух соседних облаков заключаются в следующем: облака имеют форму параллелепипедов, которые расположены в плоском слое, солнечное излучение падает перпендикулярно на этот слой по оси x , взаимодействие между облаками происходит по осям y , z , облака обмениваются потоками излучения, выходящими через соседние боковые поверхности параллелепипедов.

При использовании такой модели коэффициент радиационного взаимодействия облаков не зависит прямо от расстояния между облаками и их взаимного расположения, и может быть определен, исходя из следующих соображений: если поперечные оптические размеры облаков τ_y и τ_z таковы, что

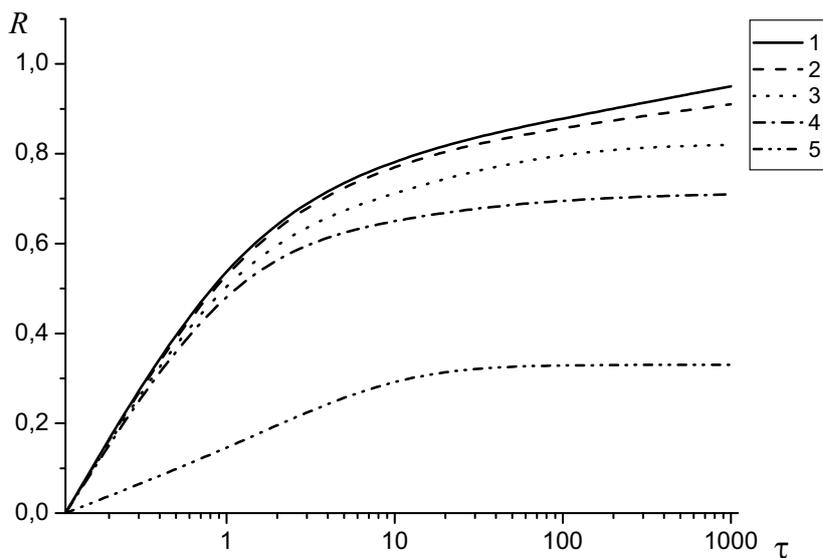
коэффициент отражения излучения R не зависит от изменения поперечных оптических размеров взаимодействующих облаков, то можно считать, что коэффициент взаимодействия равен нулю. В этом случае расчет радиационного баланса атмосферы при разорванной облачности проводится аналогично расчету радиационного баланса неограниченной рассеивающей среды с использованием соответствующих методов решения [1]. В общем случае решение проблемы изменяющегося взаимодействия между облаками находится приближенно с использованием эмпирических зависимостей, полученных при измерениях в земной атмосфере и в модельных экспериментах.

В данной статье представлена аналитическая методика расчета радиационного взаимодействия между облаками в зависимости от их размеров, оптических свойств и расстояния между ними с использованием метода многократных отражений.

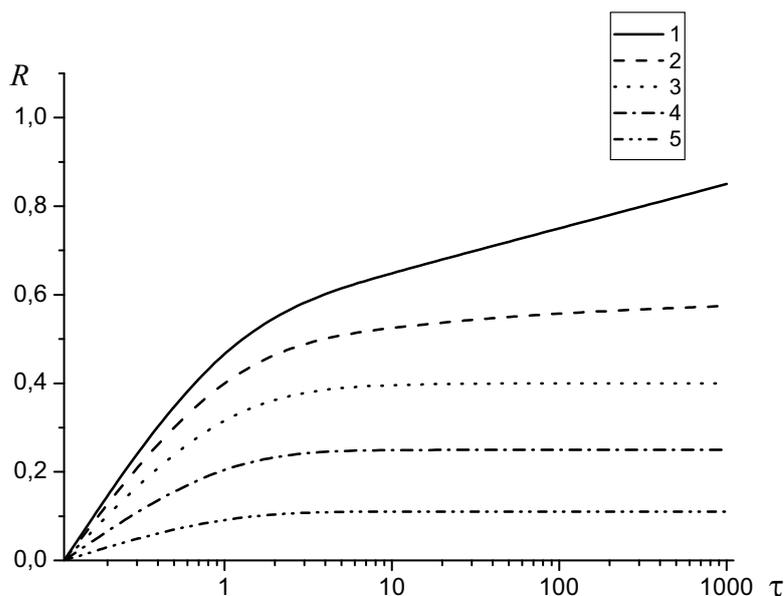
Воспользуемся моделью облака в виде параллелепипеда с оптическим объемом $V = \tau_x \times \tau_y \times \tau_z$. Освещение осуществляется коллимированным потоком оптического излучения, направленным по нормали к плоскости yz при использовании декартовой системы координат. В процессе исследований изучалось влияние величины оптического объема на величины пропускания T и отражения R при сферической и облачной $C1$ [3] индикатрисами рассеяния излучения. Дисперсная среда, заполняющая параллелепипед, считается однородной и консервативной (вероятность выживания кванта $\Lambda = 1$).

Известно [4, 5], что изменение поперечных оптических размеров среды фиксированной длины приводит к изменению баланса излучения, распространяющегося в ограниченном объеме дисперсной среды, и, следовательно, величины отражения (рис. 1, 2).

Оптические размеры облаков существенно влияют на радиационный баланс атмосферы, однако, если эти размеры достигают определенной величины, зависящей от продольной оптической толщи τ_x (рис. 1, 2), то составляющие радиационного баланса (пропускание, отражение и поглощение) становятся постоянными [6, 7].



а



б

Рис. 1. Зависимость коэффициента отражения R от поперечной оптической плотности τ отдельного облака. $\Lambda=1$. 1) $\tau_x=100$; 2) $\tau_x=20$; 3) $\tau_x=10$; 4) $\tau_x=5$; 5) $\tau_x=1$. Индикатриса рассеяния: а) сферическая; б) облачная $C1$

Прохождение излучения через систему облаков при определенном балле облачности сопровождается радиационным взаимодействием между ними, и наиболее существенным является взаимодействие между соседними облаками.

Определим величину радиационной добавки в составляющие баланса излучения одного облака $D=D_1+D_2$, которая обусловлена многократным взаимодействием с соседним облаком:

$$D_1 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 I_0^1 I_2^{2yy} I_3^{1xy} (I_1^{1yy} + 2I_3^{1yx} + 2I_3^{1yz})}{1 - \alpha_1 \alpha_2 I_2^{1yy} I_2^{2yy}};$$

$$D_2 = \frac{\alpha_1 \alpha_2 I_0^2 I_2^{1yy} I_3^{2xy} (I_1^{2yy} + 2I_3^{2yx} + 2I_3^{2yz})}{1 - \alpha_1 \alpha_2 I_2^{1yy} I_2^{2yy}}, \quad (1)$$

где D_1 – радиационная добавка от второго облака при освещении первого потоком излучения I_0^1 , D_2 – то же при освещении второго облака потоком излучения I_0^2 .

В формулах (1) введены обозначения: номер нижнего индекса соответствует коэффициентам пропускания, отражения и выхода излучения через боковую грань; цифра верхнего индекса показывает номер облака; буквы верхнего индекса отражают направление падения и выхода излучения из облака.

Коэффициенты α_1 и α_2 позволяют определить части потока рассеянного облаком излучения при оптическом взаимодействии двух соседних облаков и зависят от их геометрических размеров и расстояния между ними. Для облаков, имеющих форму куба, α_1 и α_2 можно представить как:

$$\alpha_1 = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (0,6b_1/l)^2}}; \quad \alpha_2 = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (0,6b_2/l)^2}},$$

где b_1 и b_2 – геометрические размеры первого и второго облака, l – расстояние между ними.

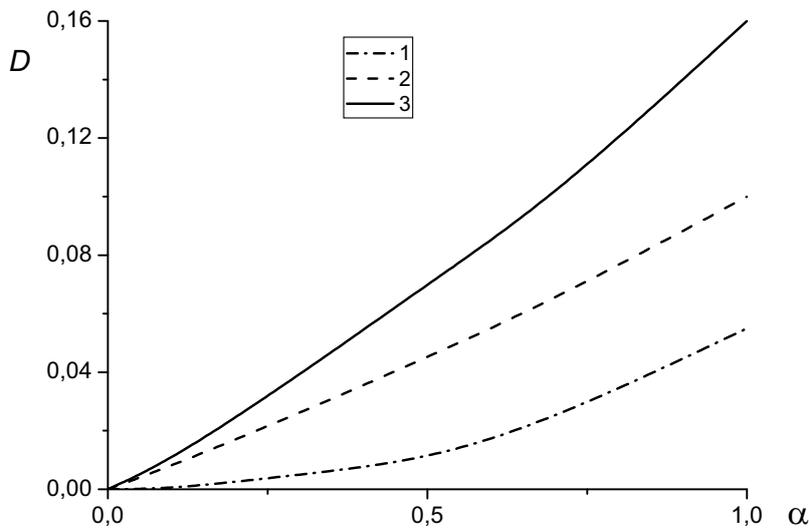
Условия нормировки:

$$I_1^{1xx} + I_2^{1xx} + 2I_3^{1xy} + 2I_3^{1xz} = 1;$$

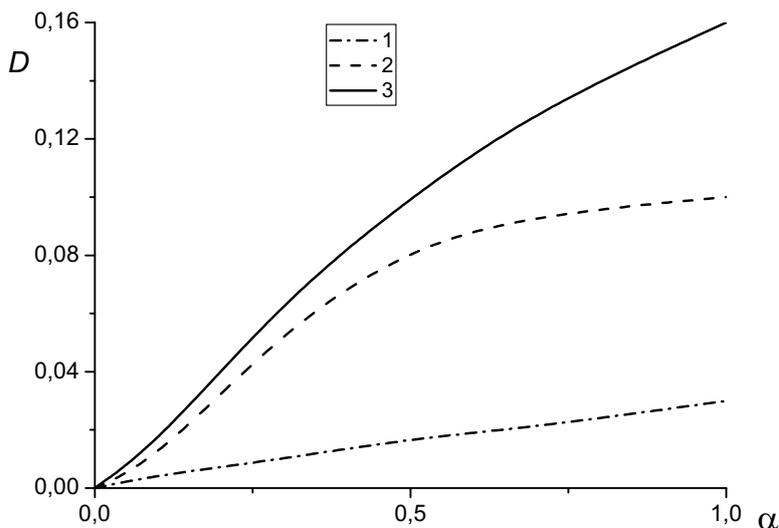
$$I_1^{1yy} + I_2^{1yy} + 2I_3^{1yx} + 2I_3^{1yz} = 1;$$

$$I_1^{2xx} + I_2^{2xx} + 2I_3^{2xy} + 2I_3^{2xz} = 1;$$

$$I_1^{2yy} + I_2^{2yy} + 2I_3^{2yx} + 2I_3^{2yz} = 1. \quad (2)$$

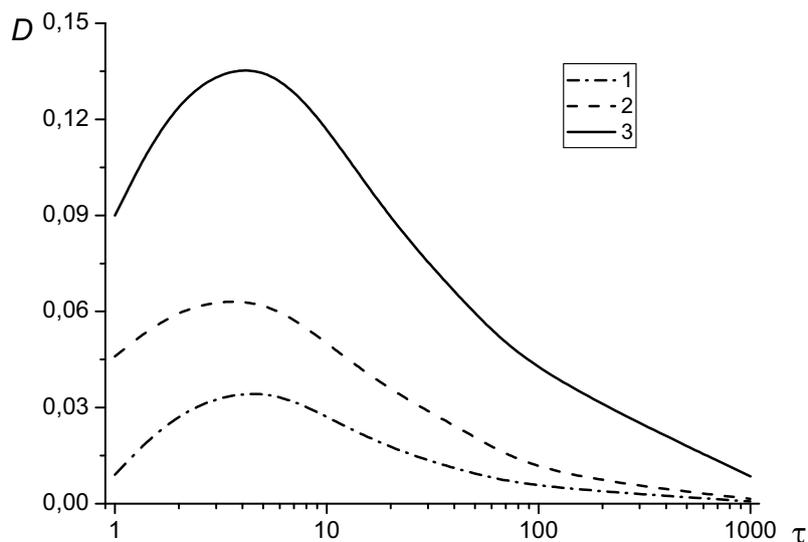


а

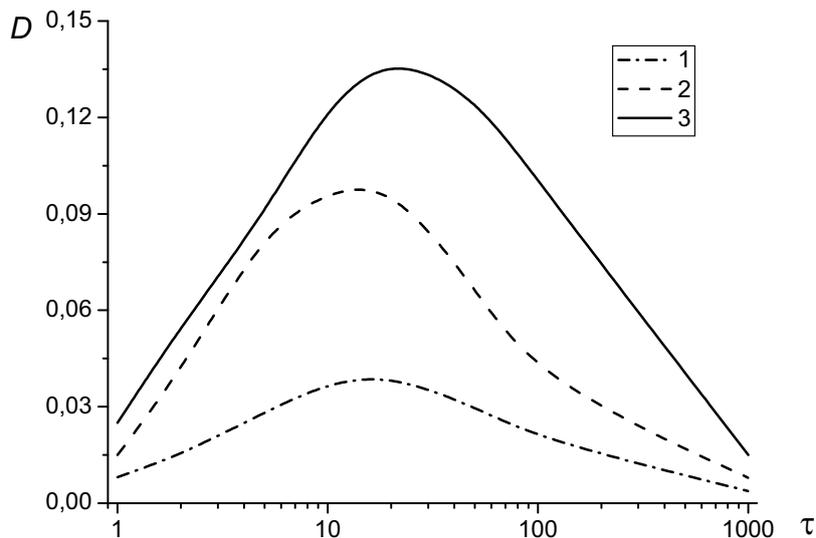


б

Рис. 2. Зависимость величины радиационной добавки от коэффициента α . Индикатриса рассеяния излучения: а) сферическая, τ : 1) 100, 2) 1, 3) 5; б) C1, τ : 1) 1; 2) 5; 3) 20



а



б

Рис. 3. Зависимость величины радиационной добавки от оптических размеров облака, коэффициент α : 1) 0,3; 2) 0,5; 3) 0,9. Индикатриса рассеяния излучения: а) сферическая; б) C1

Условия нормировки (2) используются при получении формул (1).

В частном случае радиационного взаимодействия двух одинаковых облаков, имеющих форму куба, формулы (1) упрощаются ($\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$)

$$D_1 = \frac{\alpha^2 I_0^1 I_2^{2,yy} I_3^{1,xy} (I_1^{1,yy} + I_3^{1,yx})}{1 - \alpha^2 (I_2^{1,yy})^2};$$

$$D_2 = \frac{\alpha^2 I_0^2 I_2^{1,yy} I_3^{2,xy} (I_1^{2,yy} + I_3^{2,yx})}{1 - \alpha^2 (I_2^{2,yy})^2}. \quad (3)$$

Результаты расчетов по формулам (3) приведены на рис. 2, 3.

Появление максимума радиационного взаимодействия объясняется увеличением выхода излучения через боковую поверхность при определенных расстояниях между облаками.

Выводы

1. Предложена методика расчета многократного радиационного взаимодействия двух облаков с учетом расстояния между ними.
2. Величина радиационного взаимодействия существенна на небольших расстояниях между облаками и сильно зависит от оптических размеров облаков.

3. Существует область оптических размеров облаков, при которых радиационное взаимодействие между ними максимально (при прочих равных условиях)

и определяется индикатрисой рассеяния излучения: с увеличением ее анизотропии максимум смещается в область больших оптических размеров.

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. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 168 с.
4. 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.

5. 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.
6. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Перенос излучения в дисперсной среде при ее дроблении // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 2. – С. 42–45.
7. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Перенос оптического излучения в условиях разорванной облачности // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 2. – С. 73–76.

Поступила 04.06.2010 г.

УДК 533.9.08:519.677

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО РАДАРА В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

А.А. Калашников, А.В. Шарнин

Томский политехнический университет
E-mail: Alex-in-black@rambler.ru

Показана актуальность решения прямой задачи импульсной рефлектометрии высокотемпературной плазмы. Представлена динамическая модель импульсной рефлектометрии. Модель учитывает двумерные пространственные эффекты взаимодействия зондирующей волны и плазмы при умеренных требованиях к вычислительным ресурсам.

Ключевые слова:

Импульсная рефлектометрия, высокотемпературная плазма, динамическая модель, распространение микроволнового излучения в плазме.

Key words:

Microwave pulsed reflectometry, fusion plasma, dynamical model, probing microwave propagation in plasma.

Введение

В настоящее время создано большое количество экспериментальных установок управляемого термоядерного синтеза (УТС) типа токамак [1], однако проблема создания термоядерного реактора с положительным коэффициентом полезного действия остается нерешенной. Решение этой проблемы включает в себя множество принципиальных подзадач, актуальных в настоящее время, одной из которых является повышение точности определения параметров протекающих в плазме процессов [2].

Экспериментальное определение параметров этих процессов связано с преодолением ряда принципиальных трудностей. К ним относятся ограничения доступа к плазме, накладываемые конструкцией вакуумной камеры, необходимость использования преимущественно бесконтактных методов косвенного измерения параметров плазмы, высокая скорость исследуемых процессов, проблемы решения обратных задач [3] обработки экспери-

ментальных данных с целью определения искомых параметров плазмы и их пространственно-временных распределений.

В работе рассматриваются вопросы моделирования процесса распространения зондирующей электромагнитной волны импульсного рефлектометра [4] в плазме установки УТС. Показана актуальность задачи моделирования, представлена аналитическая модель импульсной рефлектометрии, обсуждаются возможности ее применения.

Методика импульсной рефлектометрии плазмы

Импульсная рефлектометрия [4] является бесконтактным методом измерения применяемого для оценки пространственно-временного распределения плотности электронов в плазме установок УТС. Схема зондирования плазмы по методу импульсной рефлектометрии представлена на рис. 1.

В основу метода заложены следующие принципы. Импульсный радар-рефлектометр (ИРР) испускает монохроматический волновой пакет с задан-