

**Выводы**

Разработан термографический метод прогнозирования циклического ресурса деталей с макротрещинами, позволяющий:

- 1) контролировать развитие трещины по кинетике температуры на поверхности детали вблизи вершины трещины;

- 2) уменьшить погрешность прогнозирования в несколько раз, поскольку при использовании метода Пэриса погрешность прогнозирования может превышать 100 %;
- 3) использовать метод для деталей, у которых затруднено наблюдение за развитием трещины.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Куриленко Г.А. Исследование трещиностойкости металлов термографическим методом // Обработка металлов. – 2010. – № 3 (48). – С. 41–44.
2. Куриленко Г.А. Контроль усталостной прочности деталей по изменению энтропии очага усталостной трещины // Дефектоскопия. – 1989. – № 7. – С. 53–57.
3. Методические указания. Расчеты и испытания на прочность, методы механических испытаний материалов. Определение

характеристик сопротивления развитию трещин (трещиностойкость) при циклическом нагружении. РД 50-345-82. – М.: Изд-во стандартов, 1983. – 96 с.

4. Механика разрушения и прочность материалов. Справочное пособие. Т. 4 / под ред. В.В. Панасюка. – Киев: Наукова думка, 1990. – 679 с.

Поступила 22.03.2012 г.

УДК 535.36

**ВЛИЯНИЕ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА РАДИАЦИОННЫЙ БАЛАНС ДИСПЕРСНОЙ СРЕДЫ**

Б.В. Горячев, С.Б. Могильницкий

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

*Рассмотрен перенос излучения в дисперсной среде, ограниченной отражающими поверхностями. Показано, что отражающая и поглощательная способности системы дисперсная среда-отражающая поверхность не зависят от коэффициента отражения поверхности при достижении определенной величины оптической плотности среды. Изучено влияние положения отражающей поверхности на поглощательную способность подобной системы.*

**Ключевые слова:**

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

**Key words:**

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

Распространение излучения в дисперсной среде обычно происходит при наличии поверхностей, ограничивающих среду, и влияющих на радиационный баланс. Наибольшее влияние на этот процесс оказывают поверхности, расположенные по направлению распространения потока излучения, т. е. на входе и выходе дисперсной среды. Оптические исследования дисперсных сред должны учитывать наличие отражающих поверхностей, а при определении радиационного баланса атмосферы [1] отражающей поверхностью для солнечного излучения является поверхность планеты (отражающая поверхность за средой), и для уходящего теплового излучения (отражающая поверхность перед средой). При этом не рассматриваются процессы взаимодействия излучения с отражающей поверхностью [2], а также статистический характер пространственного распределения коэффициентов отражения подстилающей поверхности [3].

Целью данной работы является определение закономерностей переноса излучения на основе представления дисперсной среды в виде прямоугольного параллелепипеда, где отражающими являются поверхности на передней и задней гранях (по направлению распространения излучения), при нормальном падении потока излучения на поверхность. Характеристики радиационного баланса дисперсной среды определялись с использованием метода многократных отражений [4, 5]. Появление исследований, улучшающих стандартные методы решения уравнения переноса излучения [6], показывает, что проблема корректного учета влияния отражающих поверхностей на радиационный баланс существует.

Определялись следующие характеристики радиационного баланса: отражательная способность  $B(\tau, a, \Lambda)$  и коэффициент пропускания  $A(\tau, a, \Lambda)$  системы дисперсная среда-отражающая поверхность, поглощательная способность  $C(\tau, a, \Lambda)$  дисперсной

среды, коэффициенты поглощения отражающих поверхностей  $D_1(\tau, a, \Lambda)$  и  $D_2(\tau, a, \Lambda)$ , находящихся перед и за дисперсной средой, соответственно. Введем обозначения: оптические размеры параллелепипеда  $\tau_x \times \tau_y \times \tau_z$  (излучение распространяется по оси  $x$ ); индикатриса рассеяния излучения, характеризуемая степенью вытянутости  $a = (\eta + 2\mu) / (\beta + 2\mu)$ ,  $\eta$ ,  $\beta$ ,  $\mu$  – интегральные параметры индикатрисы рассеяния [4, 7]; вероятность выживания кванта  $\Lambda$ ; коэффициенты отражения поверхностей  $r_1$  и  $r_2$ , пропускания  $t_1$  и  $t_2$ . На основе метода многократных отражений получены формулы:

$$A(\tau, a, \Lambda) = \frac{t_2 F_1 F_2}{F_3 F_4 - F_1^2 F_5 F_6};$$

$$B(\tau, a, \Lambda) = \frac{t_1 F_4 (1 - F_7) - F_1^2 F_6}{F_3 F_4 - F_1^2 F_5 F_6};$$

$$C(\tau, a, \Lambda) = \frac{(1 - F_1)(F_4 - F_1 F_6) F_7}{F_3 F_4 - F_1^2 F_5 F_6};$$

$$D_1(\tau, a, \Lambda) = \frac{(1 - r_1 - t_1)[F_4 (1 - F_7) - F_1^2 F_6]}{F_3 F_4 - F_1^2 F_5 F_6};$$

$$D_2(\tau, a, \Lambda) = \frac{(1 - r_2 - t_2) F_1 F_2}{F_3 F_4 - F_1^2 F_5 F_6}.$$

В формулах введены обозначения:

$$F_1 = \exp[-k(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) \tau_x]; \quad F_2 = 1 - R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda);$$

$$F_3 = 1 - r_1 R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda); \quad F_4 = 1 - r_2 R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda);$$

$$F_5 = R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) - r_1; \quad F_6 = R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) - r_2;$$

$$F_7 = 1 - R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda).$$

Переменные коэффициенты  $R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$  и  $k(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)$  имеют следующий вид:

$$R(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) = \frac{k(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) - P(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)}{k(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) + P(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)};$$

$$k(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda) = \sqrt{P(\tau_y, \tau_z, a, \Lambda)[1 - \Lambda(\eta - \beta)]}.$$

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:

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

Рассмотрим некоторые результаты расчетов потоков монохроматического излучения по данным формулам. Поперечные оптические размеры дисперсной среды равны  $\tau_y = \tau_z = 1000$ . Представленные на рис. 1 данные показывают, что величина уходящей радиации существенно зависит от коэффициента отражения подстилающей поверхности при небольшой величине оптической толщи слоя атмосферы, и практически не изменяется для  $\tau_x > 20$ . Такая закономерность наблюдается при сферической индикатрисе рассеяния излучения, те же явления наблюдаются для сильно вытянутой индикатрисы рассеяния излучения, но при гораздо больших значениях оптической толщи.

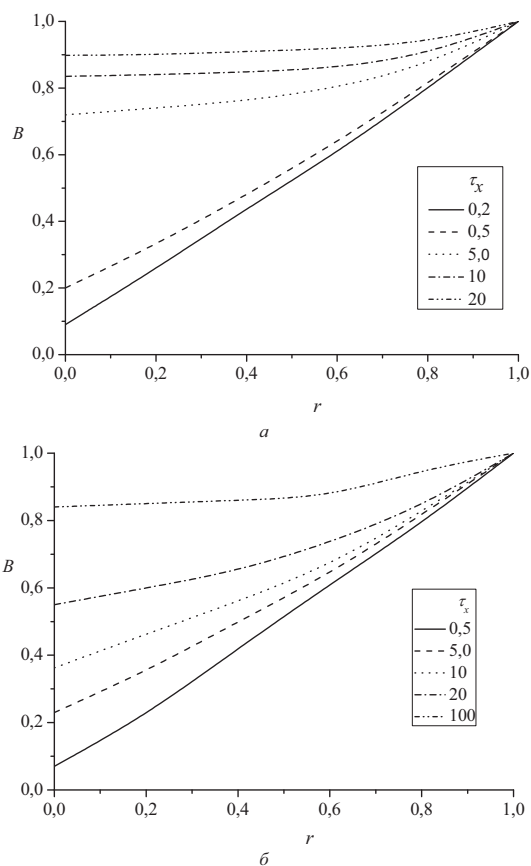


Рис. 1. Зависимость отражающей способности  $B$  системы дисперсная среда-отражающая поверхность от коэффициента отражения подстилающей поверхности  $r$ , вероятность выживания кванта  $\Lambda=1$ : а) сферическая индикатриса рассеяния излучения; б) коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния излучения  $a=15,6$

Существенное влияние на радиационный баланс атмосферы оказывает нагрев земной поверхности в присутствии слоя аэрозоля. Представленные на рис. 2 результаты показывают, что поглощательная способность  $D$  подстилающей поверхности почти не зависит от типа поверхности при  $\tau_x > 20$  и существенно изменяется при уменьшении оптической толщи дисперсной среды.

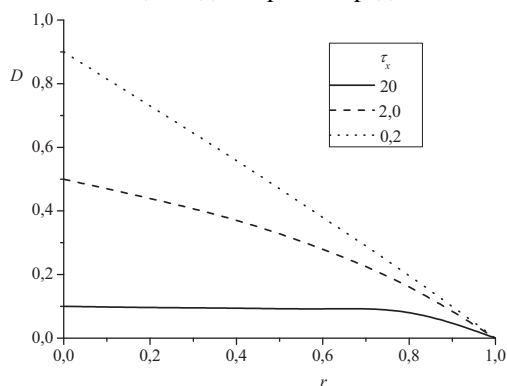
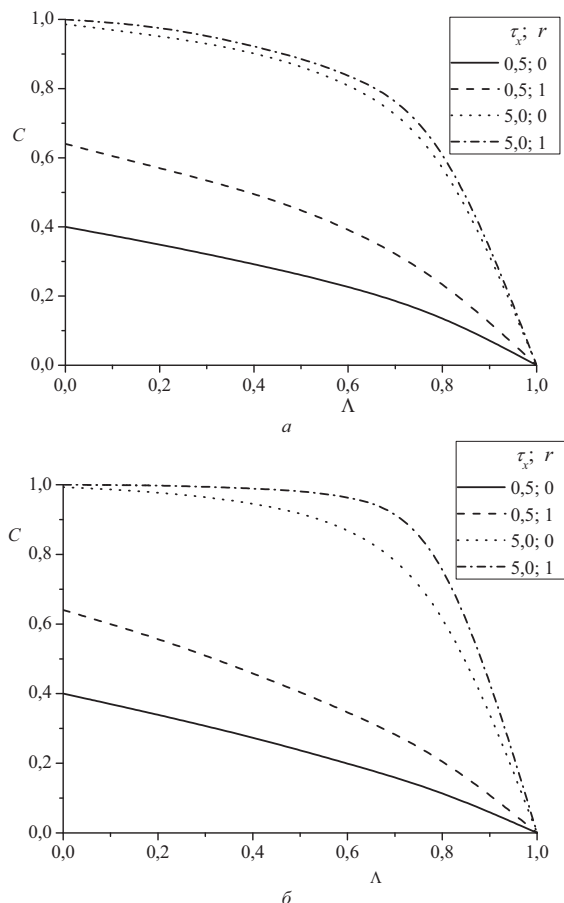


Рис. 2. Зависимость поглощательной способности  $D$  подстилающей поверхности от коэффициента отражения  $r$ . Сферическая индикатриса рассеяния излучения. Вероятность выживания кванта  $\Lambda=1$

На рис. 3 представлены результаты вычислений поглощательной способности  $C$  дисперсной среды с отражающей поверхностью за средой при двух резко различающихся индикатрисах рассеяния излучения. Поглощательная способность дисперсной среды почти не зависит от коэффициента отражения поверхности при оптической толще  $\tau_x > 5$  и сферической индикатрисе рассеяния излучения; форма индикатрисы рассеяния излучения не влияет на поглощательную способность при малых значениях оптической плотности дисперсной среды.

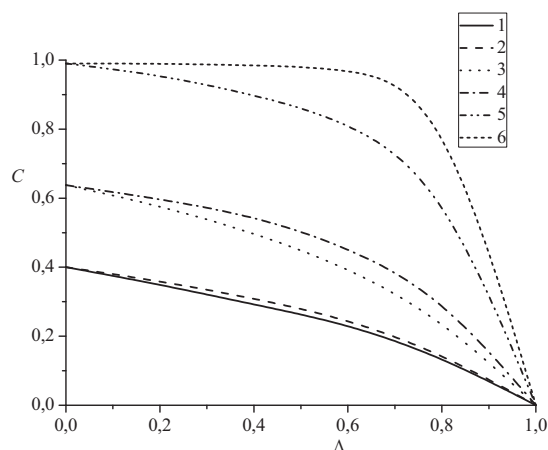


**Рис. 3.** Зависимость поглощательной способности  $C$  системы дисперсная среда-отражающая поверхность от вероятности выживания кванта  $\Lambda$ : а) сферическая индикатриса рассеяния излучения; б) коэффициент асимметрии индикатрисы рассеяния излучения  $a=15,6$

При вычислении величины уходящей радиации, которая обусловлена нагретой подстилающей поверхностью, отражающая поверхность будет находиться перед средой. На рис. 4 представлены результаты расчетов поглощательной способности  $C$  системы отражающая поверхность-дисперсная среда для сферической индикатрисы рассеяния излучения.

Все возможные значения поглощательной способности  $C$  лежат между кривыми 1 и 2 при  $\tau_x=0,5$ ; 3 и 4 при  $\tau_x=1$ ; 5 и 6 при  $\tau_x=5$ , причем с увеличением оптической толщи расстояние между кривыми увеличивается, что объясняется возрастанием поглощения при многократном рассеянии излучения.

Столь небольшое отличие кривых 1 и 2 при малых оптических толщах среды означает, что поглощательная способность дисперсной среды с отражающей поверхностью перед средой практически не зависит от типа поверхности при любых значениях вероятности выживания кванта. Наибольшее расхождение между кривыми 5 и 6 наблюдается при  $\Lambda=0,75$ . Так как система отражающая поверхность-дисперсная среда моделирует ситуацию в атмосфере с уходящим длинноволновым излучением, то распространение излучения в атмосфере с сильным поглощением соответствует прохождению излучения вне окон прозрачности атмосферы.



**Рис. 4.** Зависимость поглощательной способности  $C$  системы отражающая поверхность-дисперсная среда от вероятности выживания кванта  $\Lambda$ . Сферическая индикатриса рассеяния излучения. Отражающая поверхность перед средой.  $\tau_x=0,5$ : 1)  $r_1=0$ ; 2)  $r_1=1$ .  $\tau_x=1$ : 3)  $r_1=0$ ; 4)  $r_1=1$ .  $\tau_x=5$ : 5)  $r_1=0$ , 6)  $r_1=1$

### Выводы

1. Показано, что отражающая способность системы дисперсная среда-отражающая поверхность не зависит от коэффициента отражения поверхности при достижении определенной величины оптической плотности среды. Предельная величина оптической плотности зависит от формы индикатрисы рассеяния излучения.
2. Поглощательная способность дисперсной среды почти не зависит от коэффициента отражения поверхности при оптической толще свыше 5 и сферической индикатрисе рассеяния излучения; форма индикатрисы рассеяния излучения не влияет на поглощательную способность при малых значениях оптической плотности дисперсной среды.
3. Поглощательная способность отражающей (подстилающей) поверхности почти не зависит от типа поверхности при больших оптических толщах среды, и существенно меняется при уменьшении оптической толщины слоя аэрозоля.
4. Поглощательная способность системы дисперсная среда-отражающая поверхность меняется при изменении положения отражающей поверхности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 264 с.
2. Кизель В.А. Отражение света. – М.: Наука, 1973. – 352 с.
3. Зуев В.Е., Титов Г.А. Оптика атмосферы и климат. – Л.: Гидрометеоздат, 1996. – 256 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. Kim A.D. Correcting the diffusion approximation at the boundary // Journal of the Optical Society of America. A. – 2011. – V. 28. – № 6. – P. 1007–1015.
7. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 168 с.

Поступила 29.12.2011 г.

УДК 621.039.51

## ПУТИ МОДЕРНИЗАЦИИ КАНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА ИВГ.1М

И.В. Прозорова

Институт атомной энергии Национального ядерного центра, г. Курчатов, Казахстан  
E-mail: Prozorova@nnc.kz

*Рассмотрены варианты перевода реактора ИВГ.1М на топливо пониженного обогащения. Приведены результаты оценок основных нейтронно-физических параметров активной зоны модернизированного реактора ИВГ.1М. Сделан вывод о том, что в качестве нового вида топлива могут выступать уран-цирконевые твэлы с повышенной концентрацией урана в сердечнике и с обогащением по  $^{235}\text{U}$  до 20 %.*

### Ключевые слова:

*Реактор ИВГ.1М, активная зона, технологические каналы, твэлы, низкообогащенное топливо, нейтронно-физические расчеты.*

### Key words:

*Reactor IVG.1M, core, process channels, fuel elements, low-enriched fuel, neutronic calculations.*

Исследовательский водоохлаждаемый гетерогенный реактор ИВГ.1М является модернизацией реактора – прототипа ракетного двигателя ИВГ1. Физический пуск ИВГ1 состоялся в 1972 г., энергетический – в 1975 г. В 1975–1988 гг. в реакторе ИВГ.1 испытано 4 комплекта ТВС различных опытных активных зон реакторов для ядерных ракетных двигателей (ЯРД) и ядерно-энергодвигательной установки (ЯЭДУ). Возможность замены активной зоны реактора ИВГ.1 позволила использовать различные типы технологических каналов, отличающихся по назначению, размерам, нагрузке по  $^{235}\text{U}$ , максимальной мощности, виду, значениям теплогидравлических параметров – температуры, давления и расхода газообразного теплоносителя. Поэтому предельные значения параметров каждой из испытанных модификаций активной зоны определялись не проектными характеристиками самого реактора, а проектными данными технологических каналов, входящих в состав активной зоны.

Испытания газоохлаждаемых ТВС проводились по разомкнутому циклу с выбросом теплоносителя в атмосферу. Как показала практика, вынос радиоактивных продуктов деления на пусках был близок по качественному составу к радиоактивным выбросам АЭС при их нормальной эксплуатации, а мощность экспозиционной дозы на границе санитарно-защитной зоны была близка к фоновым

значениям для данной местности. Тем не менее, в связи с ужесточением после Чернобыльской катастрофы требований по обеспечению экологической безопасности испытаний, в 1989 г. была начата модернизация реактора ИВГ.1 с целью создания на реакторе двух петлевых установок для испытаний:

- ТВС газоохлаждаемых реакторов, оснащенной системой закрытого выброса газообразного теплоносителя;
- модельных ТВС водоохлаждаемых реакторов в переходных и аварийных режимах для обоснования безопасности объектов ядерной техники.

На первом этапе модернизации активная зона реактора была укомплектована водоохлаждаемыми технологическими каналами (ВОТК) и соответствующим образом была модернизирована система подачи воды на охлаждение реактора и ВОТК. Физический пуск модернизированного реактора ИВГ.1М проведен 25 мая – 15 июня 1990 г., энергетический – 18 декабря 1990 г. Этим обеспечена сама возможность работы реактора в современных условиях (без загрязнения внешней среды радиоактивными продуктами). Органы управления реактора остались прежними. Основную функцию управления реактором выполняют регулирующие бараны, расположенные в отражателе реактора.