Наука и Образование
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Сетевое научное издание
ISSN 1994-0448

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Электрон. журн. 2014. № 11. С. 596–606.

DOI: **10.7463/1114.0737348**

Представлена в редакцию: 06.11.2014

УДК 001.891.573

Учёт глубоких дефектов отражающей поверхности при моделировании радиационного теплообмена в зеркальных концентрирующих системах

Леонов В. В.[1,*]

[*]lv@bmstu.ru

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе рассматриваются вопросы, связанные с моделированием радиационного теплообмена между элементами зеркальных концентрирующих систем (ЗКС), работающих в составе солнечных энергоустановок. Основное внимание уделено исследованию влияния глубоких дефектов (полостей, кратеров) отражающей поверхности на характеристики зеркал, а также особенностям учёта таких дефектов при математическом моделировании радиационного теплообмена в ЗКС. Наличие глубоких дефектов не характерно для зеркальных систем, но их появление возможно в процессе эксплуатации в результате эрозии или каких-либо физических повреждений. Например, для космической техники это в первую очередь микрометеорная эрозия.

Ключевые слова: солнечная энергетика, зеркальные концентрирующие системы, радиационный теплообмен, математическое моделирование, эрозионное воздействие

Введение

В силу относительно низкой плотности потока солнечного излучения на орбите Земли, а тем более на её поверхности, для создания высокоэффективных солнечных энергоустановок (СЭУ), особенно высокотемпературных, в их составе необходимо использовать концентраторы солнечного излучения [1-3]. По этой же причине для создания СЭУ большой мощности необходима разработка крупногабаритных концентраторов солнечного излучения при обеспечении жёстких требований к их форме и качеству отражающей поверхности. Наибольшее распространение получили зеркальные концентрирующие системы (ЗКС) [1, 2].

При проектировании СЭУ необходимо располагать достаточно достоверными и экономичными методами и средствами, позволяющими анализировать характеристики ЗКС различной конфигурации, прогнозировать их в зависимости от условий эксплуатации и, соответственно, выбирать наиболее подходящую систему для решения конкретных задач.

Экспериментальное определение характеристик ЗКС различной конфигурации, особенно крупногабаритных, требует проведения сложных и дорогостоящих экспериментов, имеющих значительные ограничения на интерпретацию результатов (зависимость от расстояния до Солнца, спектра излучения), а также ограничений, накладываемых из-за габаритов конструкции и наличия силы тяжести [1, 3, 4]. Поэтому особый интерес представляет разработка математических моделей, позволяющих рассчитывать характеристики таких ЗКС с учётом влияния условий эксплуатации, конструктивных особенностей, деформаций, шероховатости и других дефектов отражающей поверхности.

Анализ основных подходов к математическому моделированию радиационного теплообмена в таких системах [1, 3, 5-7] с целью определения их характеристик показал, что математическую модель данного процесса для рассматриваемого случая наиболее рационально построить на принципах статистического моделирования с использованием методов Монте-Карло и "пучковой" модели излучения [5-7], а математическую модель распределения полей температур и деформаций – с применением метода конечных элементов (МКЭ) [5, 8].

Модель теплообмена, построенная с применением указанных выше методов и принципов, позволяет эффективно моделировать распространение тепловых потоков в конструкциях произвольной геометрии с учётом спектральных, пространственных и физических свойств и характеристик как излучения, так и материала. При этом для получения достоверной картины распределения радиационных тепловых потоков необходимо также обеспечить качественное моделирование характеристик отражающих поверхностей, а в первую очередь шероховатости.

Применительно к задачам теплообмена излучением шероховатость реальных поверхностей можно разделить на две категории [3]:

1) малые неровности поверхности, на которых падающее излучение отражается однократно;
2) глубокие дефекты (полости), в которых падающее излучение отражается многократно.

Вопросы, связанные с моделированием малых неровностей поверхности, достаточно подробно рассмотрены в работе [5], в рамках же этой работы подробно остановимся только на учёте глубоких дефектов при построении геометрической модели и моделировании радиационного теплообмена. При этом стоит отметить, что наличие глубоких полостей не характерно для рабочих поверхностей ЗКС, но появление таких дефектов поверхности возможно в процессе эксплуатации в результате эрозии или каких-либо физических повреждений.

1. Особенности построения геометрической модели отражающей поверхности

При моделировании технической системы на ЭВМ с целью проведения вычислительного эксперимента и определения требуемых характеристик эту систему заменяют геометрической моделью. При этом геометрическая модель должна отражать только те свойства реальной технической системы, которые необходимо учитывать в рамках проводимого вычислительного эксперимента. Как правило, число учитываемых свойств (характеристик) системы зависит от стадии проектирования и определяет точность получаемых результатов, а также время, необходимое для проведения эксперимента.

При решении задач, направленных на определение характеристик распределения тепловых потоков и построение полей температур, поверхность рассматриваемой геометрической модели удобно разбить на более мелкие составляющие. Как правило, используются треугольные или четырёхугольные элементы, из которых набираются более сложные поверхности, в том числе и криволинейные, в частности может сразу строится конечноэлементная сетка для последующего использования МКЭ.

При построении геометрической модели с учётом шероховатости и других дефектов поверхности можно выделить два основных подхода:

1) все дефекты всех поверхностей закладывается непосредственно в геометрической модели;
2) дефекты моделируется только в области точки взаимодействия конкретного пучка излучения с геометрической моделью.

При первом подходе вся поверхность рассматриваемой геометрической модели покрывается сеткой треугольных элементов, моделирующих дефекты поверхности с заданными параметрами (рис. 1а). Такой подход позволяет рассчитывать распределение потоков отражённого излучения с учётом влияния локальных погрешностей, многократного переотражения в глубоких полостях, но требует очень мелкого разбиения поверхности, пропорционального шагу шероховатости.

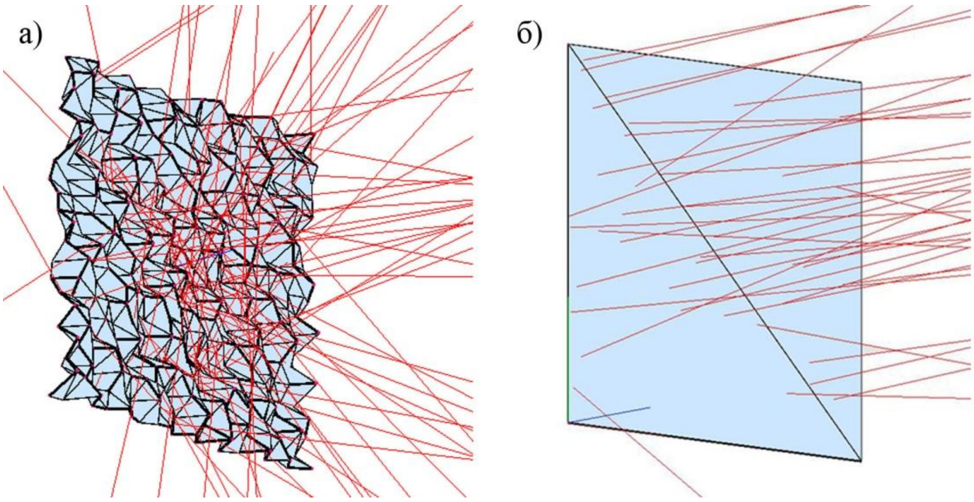

Рис. 1. Отражение излучения от шероховатой поверхности: а) шероховатость учтена при построении геометрической модели; б) шероховатость моделируется в точке падения пучка излучения

При втором подходе в геометрическую модель закладываются только меганеровности, т.е. отклонения формы отражающей поверхности от идеальной в результате воздействия внешних сил, погрешности изготовления и развёртывания [2, 5] (рис. 1б), а влияние шероховатости и других возможных дефектов моделируют в точке падения рассматриваемого пучка излучения на отражающую поверхность. В этом случае нет необходимости в особо мелком разбиении поверхности геометрической модели. Но такой метод не позволяет, без введения дополнительных условий, учитывать многократное переотражение на элементах шероховатости и рассматривать зоны, геометрические размеры которых меньше элементов, на которые разбивается поверхность, в том числе глубокие дефекты.

Первый подход рационально применять для определения оптических характеристик для малых элементов конструкции или для образцов с заданными свойствами поверхности, с последующим их распространением на всю конструкцию. Также он эффективен для поверхностей, на оптические свойства которых значительное влияние оказывают глубокие полости, вызывающие многократное переотражение на элементах шероховатости, что не характерно для поверхности зеркал концентраторов. Второй подход применяется для получения оптических характеристик конструкции в целом.

2. Глубокие полости

Рассмотрим образование глубоких полостей на примере космической техники, где в первую очередь необходимо рассмотреть влияние микрометеорной эрозии [2, 9].

Кинетическая энергия бомбардирующей частицы становится достаточной для преодоления предела упругости материалов при скоростях ~0,1-0,3 км/с [9]. В этом случае при ударе частица деформируется, а на поверхности тела из пластичного материала (металла) образуется вмятина с отношением глубины к диаметру $H/D \geq 0{,}1$.

По мере увеличения скорости частицы последовательно достигаются следующие пороговые скорости [9]: для процессов плавления (2-3 км/с), парообразования (10-15 км/с) и интенсивной термической ионизации паров (20-25 км/с). В соответствии с этим изменяется форма кратера, т.к. расплавленный материал выдавливается из него и при застывании образует вокруг кратера бруствер (рис. 2а). Глубина кратера увеличивается до $H/D{\sim}1$, а его дно приобретает полусферическую форму. Испарение вещества из области удара носит взрывной характер, при котором растет диаметр кратера D, а глубина H при этом изменяется незначительно (см. рис. 2а) [9].

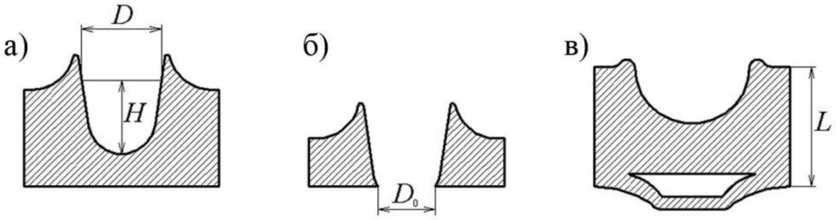

Рис. 2. Возможные механические повреждения пластины при высокоскоростном ударе

На рис. 2 представлены основные виды механических повреждений, которые могут возникнуть при столкновении высокоскоростной частицы с элементом конструкции, выполненном из пластичного материала [9]. Слева (см. рис. 2а) показан случай образования кратера в достаточно толстом элементе. Далее (рис. 2б) показан сквозной пробой элемента конструкции с образованием отверстия диаметром D_0. На рис. 2в показано образование откола на задней поверхности элемента толщиной L или его расслоения вследствие растяжения материала волной разрежения, уходящей от задней поверхности.

На рис. 3 показан кратер диаметром ~50 мкм в металлическом образце, экспонировавшемся на внешней поверхности станции «Мир» [10]. Видно, что конфигурация реального кратера может быть существенно более сложной. Часто вокруг основного кратера могут образовываться вторичные кратеры за счет диссипации возникающих при высокоскоростном соударении ударных волн на структурно-фазовых неоднородностях материала [9, 11].

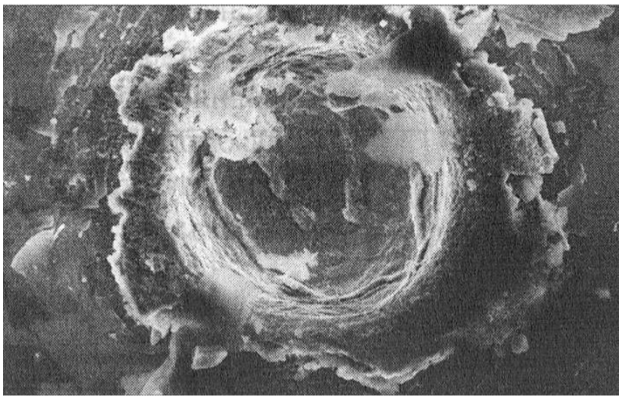

Рис. 3. Кратер от удара высокоскоростной частицы о металлический образец [10]

В литературе [9-12] представлено много различных эмпирических и теоретических соотношений для описания связи параметров, характеризующих повреждения элемента конструкции, с параметрами бомбардирующей частицы. Здесь приведем лишь наиболее простые и часто используемые выражения.

Отношение глубины H кратера к диаметру d частицы, плотность материала которой $\rho_ч$, а скорость v, определяется формулой

$$\frac{H}{d} = k\rho_ч^{\alpha} v^{\beta},$$

где k=0,3-0,6; α = 0,3-0,5; $\beta \approx 0{,}7$. Значения параметров k, α, β зависят от свойств конструкционных материалов и рассматриваемого диапазона скоростей удара.

Диаметр отверстия в тонком ($L/d < 0.5$) элементе конструкции определяется с помощью выражения

$$\frac{D_0}{d} = 2{,}4\frac{v}{a}\left(\frac{L}{d}\right)^{\frac{2}{3}} + 0{,}9,$$

где a – скорость звука в рассматриваемом материале.

Учёт глубоких полостей при создании геометрической модели, в которой все погрешности закладываются при её построении, не составляет сложности. При этом их параметры могут быть как детерминированными, так и случайными. При использовании же геометрической модели, в которой глубокие полости, как и все дефекты, моделируются в точке падения пучка излучения, появляются сложности по их учёту. Преодолеть их можно, введя дополнительный розыгрыш на возможность появления такого дефекта в данной точке, а его характеристики брать либо из предварительно полученных зависимостей или табличных значений, либо для каждого случая производить параллельный расчёт по первому способу.

3. Влияние глубоких полостей на энергетические характеристики ЗКС

Рассмотрим распределение излучение в полости (кратере), образовавшейся в результате попадания в зеркало концентратора микрометеорной частицы (Рис. 4).

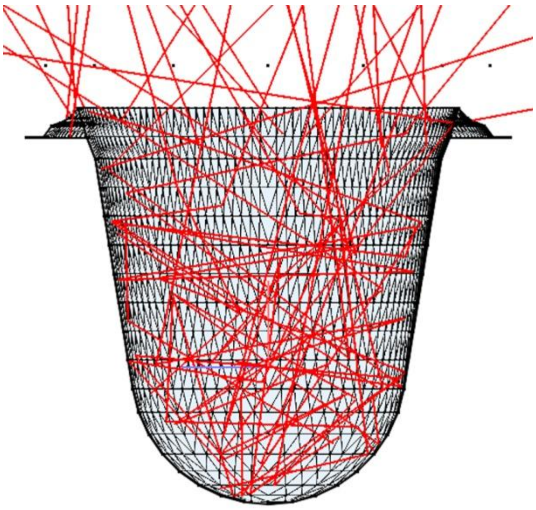

Рис. 4. Распределение излучения по микрометеорному кратеру (падающее излучение не показано)

Индикатриса отражения, зависимость двунаправленной интегральной отражательной способности p от угла отражения θ_r отнесённая к её максимальному значению $p_{\max}$ [7], от кратера (внутренней поверхности и наплыва) показана на рис. 5.

Очевидно, что наличие единичных дефектов (кратеров) не приводит к значительному изменению индикатрисы отражения ЗКС и других радиационных и энергетических характеристик системы, но с увеличением их числа будет расти диффузная составляющая в отражённом излучении, что может привести к значительному снижению энергетических характеристик СЭУ.

В качестве примера рассмотрим изменение энергетического КПД системы концентратор-приёмник (СКП), состоящей из однозеркального параболического концентратора (диаметром 12 м) и сферического полостного приёмника.

Энергетический КПД является одной из основных характеристик СКП и определяется как отношение полезной тепловой мощности, поступающей от приемника к преобразователю, к тепловой мощности, падающей на рабочую поверхность ЗКС [3]. На графиках рисунка 6 показано изменение зависимости энергетического КПД ЗКС от относительного радиуса входного отверстия приёмника (отношения радиуса входного отверстия приёмника r_0 к радиусу концентратора $r_к$) для одного и того же зеркала до эрозивного воздействия и после.

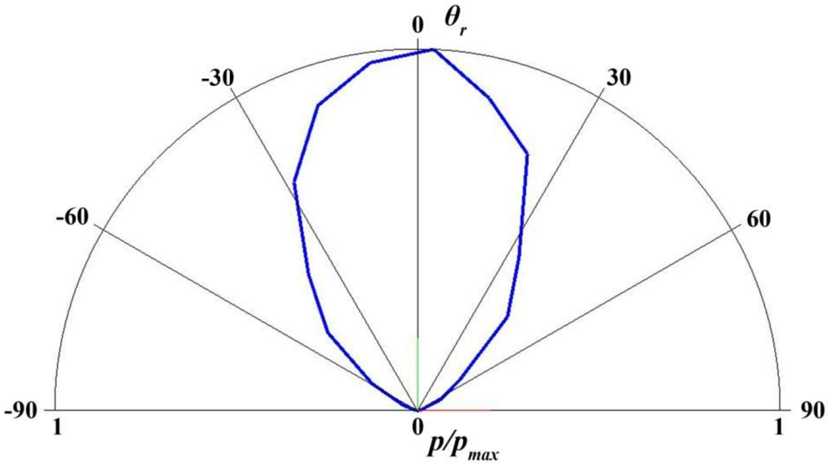

Рис. 5. Индикатриса отражения от поверхности кратера

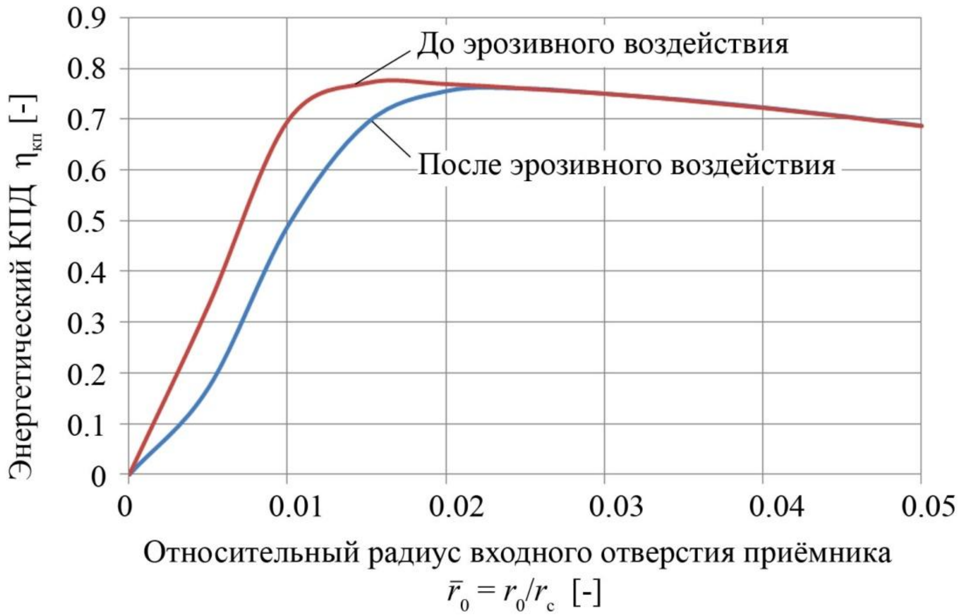

Рис. 6. Изменение зависимости энергетического КПД ЗКС от относительного радиуса входного отверстия приёмника для одного и того же зеркала до эрозивного воздействия и после

Из приведённых выше графиков можно сделать два вывода. Во-первых, видно, что энергетический КПД сначала возрастает за счёт увеличения доли отражённой энергии, попадающей в приёмник, а начиная с некоторого момента, он падает за счёт того, что доля дополнительной энергии, попавшей в приёмник из-за увеличения радиуса входного отверстия, меньше энергии, переизлучаемой приёмником в результате нагрева (в рассмотренном случае температура приёмника 1200 К) через это отверстие. Таким образом, можно утверждать, что для исследуемой системы существует оптимальное соотношение габаритов концентратора и приёмника (радиуса его входного отверстия). Во-вторых, наличие дополнительной диффузной составляющей в индикатрисе отражения приводит к уменьшению доли энергии, попадающей в приёмник, что приводит к снижению эффективности системы, но с увеличением входного отверстия приёмника этот эффект исчезает.

Заключение

В процессе эксплуатации характеристики любой технической системы могут изменять под действием различных внешних и внутренних факторов. Как правила эти изменения приводят к снижению эксплуатационных характеристик системы и могут привести к её отказу.

Возможность рассмотреть большое число альтернативных вариантов конструкции и компоновки ЗКС при математическом моделировании ещё на ранних стадиях проектирования позволяет обеспечить максимальную энергетическую и массовую эффективность системы и снизить материальные затраты на её проектирование и отработку.

Список литературы

1. Lovegrove K., Stein W. Concentrating Solar Power Technology. Principles, Developments and Applications. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2012. 708 p.
2. Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К Солнечная энергетика. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 276 с.
3. Скребушевский Б.С. Космические энергетические установки с преобразованием солнечной энергии. М.: Машиностроение, 1992. 224 с.
4. El Ouederni A.R., Ben Salah M., Askri F., Ben Nasrallah M., Aloui F.Experimental study of a parabolic solar concentrator // J. Revue des Energies Renouvelables. 2009. Vol. 12, no. 3. P. 395-404.
5. Leonov V., Bannikov A., Zharenov I. Mathematical Modeling of Radiative Heat Transfer Process in High-Temperature Solar Power Plant // Proc. 15th Int. Heat Transfer Conf. (IHTC-15) (Kyoto, Japan, 10-15 August 2014). 2014. P. 1-15.
6. Modest M.F. Radiative Heat Transfer. 3rd ed. New York: Acad. Press, 2013. 904 p.

7. Siegel R., Howell J.R., Menguc M.P. Thermal radiation heat transfer. 5th ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2010. 987 p.
8. Ramamurty G. Applied Finite Element Analysis. 2nd ed. New Delhi: I. K. International Publishing House Pvt. Ltd., 2010. 448 p.
9. Панасюк М.И. Модель космоса. В 2 т. Т. 2. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. Л.С. Новикова. М.: КДУ, 2007. 1144 с.
10. Никитушкина О.Н., Иванов Л.И., Петров А.Н., Новиков Л.С., Коношенко В.П., Соколов В.Г. Структура микрократеров на поверхности металлических образцов, экспонировавшихся в открытом космосе // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 2. С. 21-25.
11. Никитушкина О.Н., Иванов Л.И., Бедняков С.А., Новиков Л.С. Изменение морфологии поверхности металлов при сверхзвуковом соударении // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 1. С. 48-51.
12. Berthoud L., Mandeville J.C. Empirical impact equations and marginal perforation // Proc. of the 1st Europe Conf. on Space Debris (Darmstadt, 5-7 April 1993). ESA SD-01, 1993. P. 459-464.

Science & Education of the Bauman MSTU
Electronic journal
ISSN 1994-0448

Science and Education of the Bauman MSTU, 2014, no. 11, pp. 596–606.

DOI: **10.7463/1114.0737348**

Received: 06.11.2014

Mathematical Modeling of Radiant Heat Transfer in Mirror Systems Considering Deep Reflecting Surface Defects

V.V. Leonov[1,*]

[*]lv@bmstu.ru

[1]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: solar energy, mirror concentrating systems, radiation, mathematical modeling, erosion

When designing large-sized mirror concentrating systems (MCS) for high-temperature solar power plants, one must have at disposal reasonably reliable and economical methods and tools, making it possible to analyze its characteristics, to predict them depending on the operation conditions and accordingly to choose the most suitable system for the solution of particular task.

Experimental determination of MCS characteristics requires complicated and expensive experimentation, having significant limitations on interpretation of the results, as well as limitations imposed due to the size of the structure. Therefore it is of particular interest to develop a mathematical model capable of estimating power characteristics of MCS considering the influence of operating conditions, design features, roughness and other surface defects.

For efficient solution of the tasks the model must ensure simulation of solar radiant flux as well as simulation of geometrical and optical characteristics of reflection surface and their interaction. In this connection a statistical mathematical model of radiation heat exchange based on use of Monte Carlo methods and Finite Element Method was developed and realized in the software complex, making it possible to determine main characteristics of the MCS.

In this paper the main attention is given to definition of MCS radiation characteristics with account for deep reflecting surface defects (cavities, craters). Deep cavities are not typical for MCS, but their occurrence is possible during operation as a result of erosion or any physical damage. For example, for space technology it is primarily micrometeorite erosion.

References

1. Lovegrove K., Stein W. *Concentrating Solar Power Technology. Principles, Developments and Applications*. Cambridge, Woodhead Publishing Limited, 2012. 708 p.
2. Vissarionov V.I., Deryugina G.V., Kuznetsova V.A., Malinin N.K *Solnechnaya energetika* [Solar energy]. Moscow, MPEI Publishing House, 2011. 276 p. (in Russian).

3. Skrebushevskiy B.S. *Kosmicheskie energeticheskie ustanovki s preobrazovaniem solnechnoy energii* [Space Power Systems with the Solar Energy Conversion]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992. 224 p. (in Russian).
4. El Ouederni A.R., Ben Salah M., Askri F., Ben Nasrallah M., Aloui F.Experimental study of a parabolic solar concentrator. *J. Revue des Energies Renouvelables*, 2009, vol. 12, no. 3, pp. 395-404.
5. Leonov V., Bannikov A., Zharenov I. Mathematical Modeling of Radiative Heat Transfer Process in High-Temperature Solar Power Plant. *Proc. 15th Int. Heat Transfer Conf. (IHTC-15)*, 10-15 August, 2014, Kyoto, Japan, 2014, pp. 1-15.
6. Modest M.F. *Radiative Heat Transfer*. 3rd ed. New York, Acad. Press, 2013. 904 p.
7. Siegel R., Howell J.R., Menguc M.P. *Thermal radiation heat transfer*. 5th ed. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2010. 987 p.
8. Ramamurty G. *Applied Finite Element Analysis*. 2nd ed. New Delhi, I. K. International Publishing House Pvt. Ltd., 2010. 448 p.
9. Panasyuk M.I., Novikov L.S., ed. *Model' kosmosa. V 2 t. T. 2. Vozdeystvie kosmicheskoy sredy na materialy i oborudovanie kosmicheskikh apparatov* [Space model. In 2 vols. Vol. 2. Effects of space environment on materials and spacecraft's equipments]. Moscow, KDU Publ., 2007. 1144 p. (in Russian).
10. Nikitushkina O.N., Ivanov L.I., Petrov A.N., Novikov L.S., Konoshenko V.P., Sokolov V.G. Structure of microcraters on the surface of metal specimens exhibited in outer space. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2002, no. 2, pp. 21-25. (in Russian).
11. Nikitushkina O.N., Ivanov L.I., Bednyakov S.A., Novikov L.S. The change of metal surface morphology under supersound impact. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2001, no. 1, pp. 48-51. (in Russian).
12. Berthoud L., Mandeville J.C. Empirical impact equations and marginal perforation. *Proc. of the 1st Europe Conf. on Space Debris*, Darmstadt, 5-7 April 1993. ESA SD-01, 1993, pp. 459-464.