

УДК 629.78

Моделирование теплового режима космического аппарата

Судомоин П.Д., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Теплофизика»*

Научный руководитель: Егоров К.С., к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Теплофизика»*

Каськов С.И., ст. преподаватель

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Теплофизика»*

khves@power.bmstu.ru

Прогнозирование теплового состояния конструктивных элементов космического аппарата при различных режимах теплового нагружения – первый шаг при проектировании космических аппаратов различного класса, и в том числе при оценки возможности возникновения нештатных ситуаций [1,2].

Оценка теплового состояния КА возможна несколькими способами:

- на основе анализа аналогичных КА,
- проведением тепловакуумных испытаний,
- математическим моделированием.

В рамках представленной работы была разработана тепловая математическая модель малого (от 500 до 1000 кг) космического аппарата [3]. Разработанная ТММ предназначена для целей теплового анализа КА в конфигурации «на целевой орбите», то есть при летных испытаниях и при эксплуатации по целевому назначению. Методика теплового расчета космического аппарата описана в [4,5,6].

Космический аппарат дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предназначен для трассовой съемки в надир поверхности Земли в светлое время суток для данной местности, сбора и хранения получаемой информации, воспроизведения и передачи ее на средства наземного комплекса приема. Рабочая орбита КА имеет следующие параметры:

- тип орбиты – круговая солнечно-синхронная орбита;
- средняя высота – 700 км;
- наклонение – 98°.

Система обеспечения теплового режима космического аппарата предназначена для поддержания температуры конструкции и элементов в допустимых для них температурных диапазонах, а также обеспечения тепловых интерфейсов на всех этапах эксплуатации. Рабочие элементы данной системы используются для перераспределения внутренних тепловыделений КА, ограничения воздействия внешних тепловых потоков. Для компенсации периодов с пониженным тепловыделением или пониженным внешним теплопритоком к элементам космического аппарата дополнительно задействуется электронагреватели. Основными элементами система обеспечения теплового режима КА являются трехслойные сотовые приборные панели–радиаторы со встроенными аксиальными тепловыми трубами (ТТ), которые служат для равномерного распределения выделяемого приборами тепла по поверхности панели-радиатора. Соты и обшивки сотовых панелей изготовлены из алюминиевого сплава. Приборы отводят избыточное тепловыделение на панель посредством кондуктивного теплообмена через посадочные места. Для улучшения теплообмена используются теплопроводные материалы и клеи. Сброс теплоты с наружной поверхности панели осуществляется радиационным теплообменом с окружающим пространством. Для равномерного перераспределения тепла между панелям-радиаторам используются аксиальные коллекторные тепловые трубы (КТТ). На рисунке 1 показан общий вид КА. Цифрами показано положение панелей-радиаторов. 1 – тепловая панель служебного борта «+Z» (ТПСБ «+Z»); 2 – тепловая панель служебного борта «-Z» (ТПСБ «-Z»); 3 – тепловая панель целевой аппаратуры «-Z» (ТПЦА «-Z»); 4 – коллекторные тепловые трубы. Солнечные батареи не показаны.

Математическая модель состоит из системы дифференциальных уравнений и условий однозначности: геометрических, физических и граничных условий. Геометрическая часть - набор плоских выпуклых многоугольников, моделирующих наружные поверхности каркаса и оборудования КА. Такое представление конструкции предназначено в первую очередь для определения тепловых потоков, падающих на поверхности КА и уходящих с них, включая взаимное отражение между частями космического аппарата. При расчёте внешних потоков учитываются: прямой поток электромагнитной энергии от Солнца, отражённый от Земли поток солнечного излучения, инфракрасный поток от Земли, атмосферный свободно молекулярный тепловой поток.

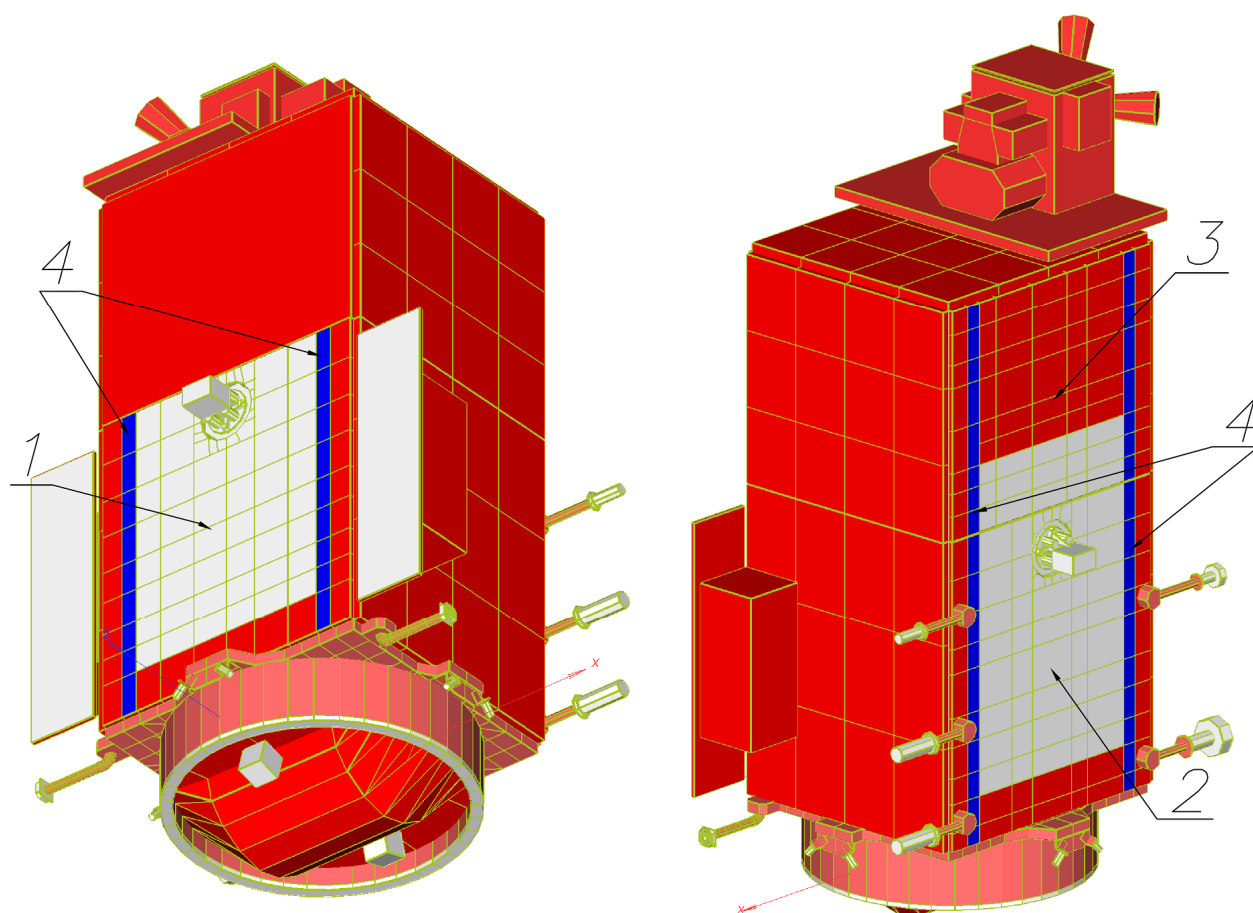


Рис.1. Общий вид космического аппарата

Тепловая часть модели представляет собой совокупность элементов, тепловых связей между элементами, нагревателей и источников тепловыделения. Элементы представляют собой сосредоточенную теплоёмкость и имеют в каждый момент времени одно значение температуры. Тепловые связи делятся на два типа: линейные и нелинейные. Линейные связи используются для учёта кондуктивного теплообмена между элементами, а нелинейные связи используются для учёта лучистого теплообмена. Некоторые элементы рассматриваются как самостоятельные источники тепловыделения. Тепловыделение в элементах служит для моделирования работы приборов и двигателей космического аппарата. Нагреватели моделируются как управляемые источники тепла – нагреватель передает тепло заданному элементу только тогда, когда температура элемента-датчика опускается ниже температуры включения. Когда температура на элементе-датчике становится выше температуры выключения, нагреватель перестаёт выделять тепло. В данной модели установлены следующие основные виды тепловых кондуктивных связей между элементами:

- листа обшивок панелей;

- сотовых панелей;
- листа обшивки и элементом сот;
- листа обшивки и элементом тепловой трубы (ТТ);
- листа обшивки и элементом коллекторных ТТ;
- листа обшивки и элементом некоторого прибора.

Связи вычислялись по следующим формулам:

$$R_i = \frac{\delta_i}{\lambda_i \cdot A_i},$$

где R_i – сопротивление термическое, К/Вт;

δ_i – расстояние от центра масс элемента до зоны контакта, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

A_i – площадь теплового контакта, м².

$$\text{Кондуктивная тепловая связь: } K = \frac{1}{R_0 + R_1 + R_2},$$

где K – значение связи, Вт/К;

R_0 – контактное термическое сопротивление;

R_1, R_2 – термические сопротивления со стороны первого и второго элементов.

Элемент обшивки представляет собой прямоугольный параллелепипед. Контактное сопротивление отсутствует: $R_0 = 0$ К/Вт. Формула для расчёта тепловой связи примет вид:

$$K = \frac{1}{R_1 + R_2}.$$

$$\text{Термические сопротивления: } R_i = \frac{\delta_i}{\lambda \cdot A},$$

где δ_i – расстояние от центра масс элем. до центра контактной площадки, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

A – площадь теплового контакта, м².

Тепловые кондуктивные связи сотовых панелей при расчете «вдоль» и «поперек» будут различными, что обосновывается данными представленными на рисунке 2.

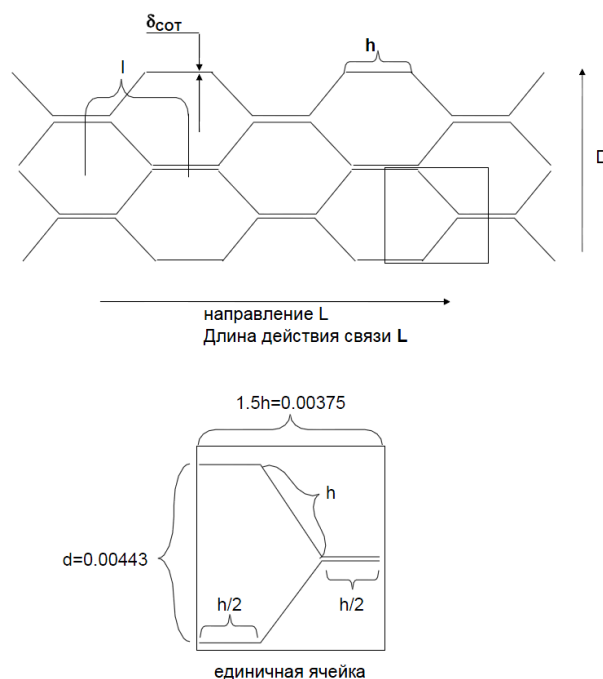


Рис. 2. Связи между элементами сотовых панелей

В связи с этим связи по сотовым панелям в направлении двойной и одинарной стенки будем считать по следующим формулам соответственно:

$$K_1 = \frac{\lambda \cdot \delta}{h} \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{D}{d} \cdot t$$

$$K_2 = \frac{\lambda \cdot \delta}{2 \cdot h} \cdot \frac{L}{1} \cdot \frac{d}{D} \cdot t,$$

где $h = 0,0025$ – размер ячейки соты, м;

$\delta = 0,00003$ – толщина стенки сот, м;

$l = 1,5 \cdot h = 0,00375$ – единичный размер соты в направлении L , м;

$d = 0,00443$ – единичный размер соты в направлении D , м;

$t = 0,017$ – высота сот, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

D – единичный размер соты в направлении D , м;

L – единичный размер соты в направлении L , м.

Элемент обшивки представляет собой прямоугольный параллелепипед. Контактное сопротивление отсутствует: $R_0 = 0$ К/Вт. Формула для расчёта тепловой связи

примет вид:
$$K = \frac{1}{R_1 + R_2}.$$

$$\text{Термические сопротивления: } R_i = \frac{\delta_i}{\lambda \cdot A},$$

где δ_i – расст. от центра масс элем. до центра контактной площадки, м;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

A – площадь теплового контакта, м².

Для определения фактической площади теплового контакта со стороны элемента сот вводится коэффициент сот – отношение фактической площади сот к площади обшивки. При расчёте связи между элементами листа обшивки и элементом, моделирующим прибор, учитывается только контактное сопротивление термопасты:

$$R_1 = R_2 = 0 \text{ К/Вт.}$$

$$\text{Кондуктивная тепловая связь: } K = \frac{1}{R_0} \quad \text{Термическое сопротивление контакта: } R_0 = \frac{\delta_0}{\lambda_0 \cdot A_0},$$

где δ_0 – толщина пасты, 0,0003 м;

λ_0 – коэффициент теплопроводности пасты, 1,6 Вт/(м·К);

A_0 – площадь теплового контакта, м².

Элементы обшивки представляют собой прямоугольные параллелепипеды. Элемент ТТ геометрии не имеет. Контактное сопротивление мало и не учитывается, принимается: $R_0 = 0 \text{ К/Вт}$. Формула для расчёта тепловой связи примет вид: $K = \frac{1}{R_1 + R_2}$.

При нахождении на орбите КА подвергается воздействию переменным по времени внешним тепловым потокам от Солнца, от Земли, а также отраженному от планеты Солнечному тепловому потоку. Тепловой поток от Солнца определяется взаимной ориентацией Солнца и плоскостей КА, а также изменением в течение года солнечной постоянной. Принято следующее расположения панелей и связанных осей: +Y-направление полета, + X - направление в нади́р. Тепловые панели радиаторы расположены по осям $\pm Z$. Прямой тепловой поток от Солнца никогда не падает на плоскость + Z.

Минимальные внешние условия (1 июля): – угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце – 17°; – величина потока – 1320 Вт/м².

Максимальные внешние условия (1 февраля): – угол между плоскостью орбиты и направлением на Солнце – 27°; – величина потока – 1420 Вт/м².

Альбедо - отраженный Солнечный тепловой поток определяется характеристиками поверхности планеты: минимальные условия – значение коэффициента 0,18, Максимальные условия – значение коэффициента 0,52.

Инфракрасный поток от Земли определяется средней радиационной температурой планеты: Минимальные условия – величина потока 200 Вт/м^2 , максимальные условия – величина потока 240 Вт/м^2 . Средние значения внешних тепловых потоков на витке представлены в таблице 1. Средние значения суммарных поглощенных внешних тепловых потоков на витке представлены в таблице 2. На панели КА по осям $\pm Z$ дополнительно действует инфракрасный тепловой поток от панелей солнечных батарей. Среднее по витку значение составляет 15 Вт/м^2 .

Таблица 1

Средние значения внешних тепловых потоков на витке

№	Плоскость действия	Минимальные условия		Максимальные условия	
		Среднее значение на участке воздействия потока на витке Вт/м ²	Среднее значение на полном витке Вт/м ²	Среднее значение на участке воздействия потока на витке Вт/м ²	Среднее значение на полном витке Вт/м ²
Прямой солнечный тепловой поток					
1	+X	274	38	273	38
2	-X	821	402	820	402
3	+Y	914	292	930	298
4	-Y	914	292	930	298
5	+Z	0	0	0	0
6	-Z	382	248	664	426
Альбе́до (отраженный от Земли солн. тепл. поток)					
1	+X	121	58	355	171
2	-X	0	0	0	0
3	+Y	35	17	102	49
4	-Y	35	17	102	49
5	+Z	35	17	102	49
6	-Z	35	17	102	49
Инфракрасный тепловой поток от Земли					
1	+X	162	162	195	195
2	-X	0	0	0	0
3	+Y	47	47	56	56
4	-Y	47	47	56	56
5	+Z	47	47	56	56

6	-Z	47	47	56	56
---	----	----	----	----	----

Таблица 2

Средние значения суммарных поглощенных внешних тепловых потоков (прямых солнечных, альбеде и инфракрасных) на витке

№	Положение панели относительно осей КА	Среднее значение суммарного поглощенного теплового потока на полном витке при $A_s = 0,25$, $\epsilon = 0,85$ Вт/м ²	
		Минимальное значение за год	Максимальное значение за год
1	+X	161,7	218,0
2	-X	100,5	100,5
3	+Y	117,2	134,4
4	-Y	117,2	134,4
5	+Z	59,2	74,9
6	-Z	121,2	181,4

Расчёт выполняется с помощью пакета прикладных программ «ТЕРМ» версии 3.02.32. с использованием следующих модулей пакета:

- VIEWF32.EXE – расчёт угловых коэффициентов методом Монте-Карло;
- ATMFLUX.EXE – расчёт внешних тепловых потоков методом Монте-Карло;
- TEMP32.EXE – расчёт температурных полей.

Описание метода Монте-Карло для расчета угловых коэффициентов приведено в [7,8]. Результатом работы модуля ППП TEMP32.EXE является массив значений температур для всех расчетных элементов, выдаваемый через заданный интервал времени. В качестве примера результатов расчета на рисунке 3 представлены графики изменения температур до выхода на квазистационарный режим и изменение установившихся температур на одном витке внешней обшивки спутника. Период одного витка составляет 5920,5 секунд.

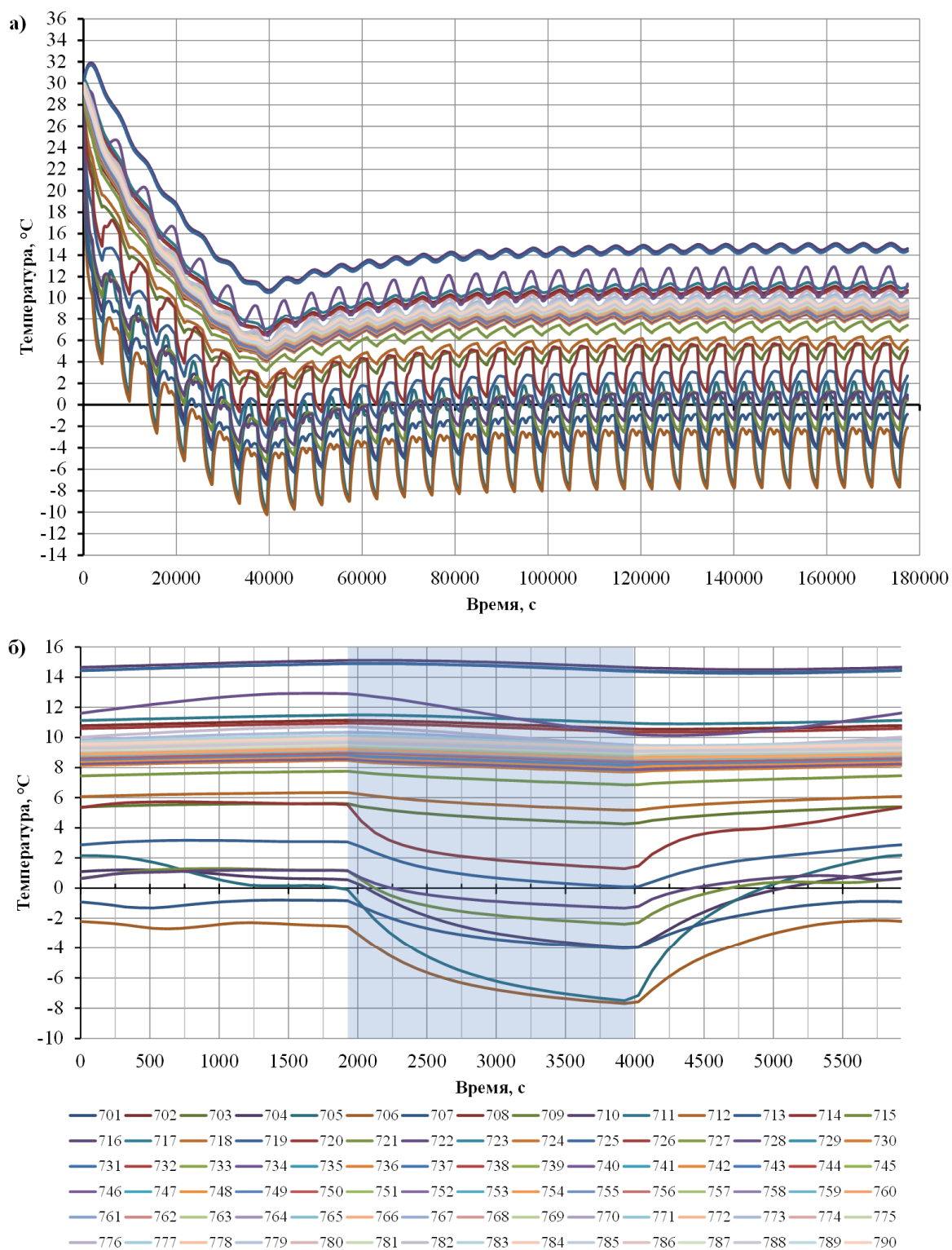


Рис. 3. Рассчитанные значения температуры внешней обшивки КА:

а) график изменения температур внешней обшивки ТПСБ «-Z» до выхода на квазистационарный режим, б) график изменения установившихся температур внешней обшивки ТПСБ «-Z» на одном витке

Список литературы

1. Галицейский Б.М., Данилов Ю.И., Дрейцер Г.А., Кошкин В.К. Теплообмен в энергетических установках космических аппаратов / под общ. ред. В.К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1975. 272 с.
2. Фаворский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе: учеб. пособие для вузов. 2-е изд. доп. М.: Высшая школа, 1972. 280 с. с ил.
3. Судомоин П.Д., Платонов К.А., Щукин С.А. Математическая модель теплового состояния малого космического аппарата // Будущее машиностроение России: сб. тр. Седьмой всерос. конф. молодых ученых и специалистов. Москва, 24-27 сентября 2014 г. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. С. 194-195.
4. Robert D. Karam, Satellite thermal control for systems engineers. Reston, Va.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998. 274 p.
5. Лукас Дж. Теплообмен и тепловой режим космических аппаратов / под ред. Н.А. Анфимова. М.: Мир, 1974. 544 с.
6. Залетаев В.М., Капинос Ю.В., Сургучев О.В. Расчет теплообмена космического аппарата. М.: Машиностроение, 1971. 207 с.
7. Зигель Р., Хауэлл Дж. Теплообмен излучением / под ред. Б.А. Хрусталева. М.: Мир, 1975. 936 с.
8. Спэрроу Э.М., Сесс Р.Д. Теплообмен излучением / под ред. А.Г. Блоха. М.: Энергия, 1971. 296 с.