



Проектирование системы обеспечения теплового режима

А.Ю. Шаенко

Москва, 2014



План лекции

1. Функции системы обеспечения теплового режима (СОТР).
2. Кондуктивный, конвективный, лучистый теплообмен, основные соотношения.
3. Факторы космического полета, оказывающие влияние на тепловой режим.
4. Влияние режимов бортовой аппаратуры на тепловой режим.
5. Влияние орбитального положения и ориентации КА и его элементов на тепловой режим.



План лекции

6. Виды СОТР и их типовой состав.
7. Средства регулирования внешнего теплообмена.
8. Чувствительные элементы СОТР.
9. Законы управления СОТР.
10. Устройство электрических нагревателей, тепловых труб и радиаторов.
11. Понятие о циклограмме работы бортовой аппаратуры.
Понятие о режимах ориентации аппарата.
12. Методика проектирования СОТР.
13. Оценка площади радиатора и мощности нагревателей.



Функции СОТР

Система обеспечения теплового режима предназначена для поддержания температуры элементов конструкции и бортовой аппаратуры в требуемых температурных интервалах.

Задача СОТР решается с помощью регулирования внешнего теплообмена и организации тепловых потоков внутри корпуса космического аппарата.

СОТР состоит из чувствительных элементов, управляющей системы и исполнительных органов.



Виды теплообмена, основные соотношения

Существует три вида теплообмена:

1. Теплопроводность. Закон Фурье. Количество теплоты δQ , переносимой за время dt через площадку dS , перпендикулярную оси x , вдоль которой изменяется температура, пропорциональна величине площадки, времени переноса и градиенту dt/dx температуры, т.е.

$$\delta Q = -\chi \frac{dT}{dx} dS dt.$$

При этом коэффициент пропорциональности χ (коэффициент теплопроводности) является характеристикой материала и измеряется в Вт/(м·К).



Виды теплообмена, основные соотношения

2. Конвекция. Закон Ньютона-Рихмана. Количество теплоты Q в процессе конвективного теплообмена пропорционально площади поверхности теплообмена F и разности температур поверхности t_{π} и среды t_{cp} :

$$Q = \alpha F (t_{\pi} - t_{cp})$$

В процессе теплоотдачи независимо от направления теплового потока Q значение его можно считать положительным, поэтому разность $t_{\pi} - t_{cp}$ берут по абсолютной величине. Коэффициент пропорциональности α называется коэффициентом теплоотдачи; его единица измерения Вт/(м²·К).



Виды теплообмена, основные соотношения

2. Конвекция. Закон Ньютона-Рихмана. Количество теплоты Q в процессе конвективного теплообмена пропорционально площади поверхности теплообмена F и разности температур поверхности t_{π} и среды t_{cp} :

$$Q = \alpha F (t_{\pi} - t_{cp})$$

В процессе теплоотдачи независимо от направления теплового потока Q значение его можно считать положительным, поэтому разность $t_{\pi} - t_{cp}$ берут по абсолютной величине. Коэффициент пропорциональности α называется коэффициентом теплоотдачи; его единица⁷ измерения $Вт/(м^2 \cdot К)$



Факторы космического полета

1. Вакуум.
2. Невесомость.
3. Тепловое солнечное излучение.
4. Отраженное планетой солнечное излучение.
5. Собственное излучение планеты.
6. Температура грунта на планете и степень его черноты.
7. Состав атмосферы планеты вблизи поверхности.
8. Взаимодействие с атмосферой при полете в ней.



Факторы космического полета

9. Коротковолновая составляющая электромагнитного спектра (ультрафиолетовое, рентгеновское, гамма-излучение), $\lambda < 400\text{нм}$.
10. Длинноволновая часть электромагнитного спектра (дальнее инфракрасное и радиоизлучение), $\lambda > 760\text{ нм}$.
11. Космические магнитные поля.
12. Воздействие от частиц космических лучей.
13. Воздействие от микрометеоритов.



Работа бортовой аппаратуры

Работа бортовой аппаратуры КА неизбежно сопровождается выделением теплоты, при этом ее распространение требуется регулировать в зависимости от режима работы всего комплекса бортовой аппаратуры. То есть, режим работы одних приборов в некоторых случаях существенно влияет на тепловой режим других приборов.



Орбитальное положение и ориентация КА

Внешний теплообмен, то есть величины лучистых потоков, поглощаемых теми или иными элементами конструкции, существенным образом зависят от ориентации как всего космического аппарата, так и отдельных его элементов на Солнце и небесное тело, вокруг которого совершается полет. Кроме того, расстояние до небесного тела, зависящее в общем случае, от положения КА на орбите, так же существенно сказывается на величинах внешних лучистых потоков.



Виды СОТР и их состав

СОТР по герметичности можно разделить на два класса: герметичные и негерметичные:

К герметичным СОТР относят системы, в которых управление температурой бортовой аппаратуры производится с помощью среды, циркулирующей внутри герметичного корпуса КА, при этом регулируемыми параметрами является температура и скорость движения среды.

К негерметичным СОТР относят системы, в которых бортовая аппаратура располагается в вакууме, а регулирование теплового режима управлением нагревателями и теплообменными контурами.



Виды СОТР и их состав

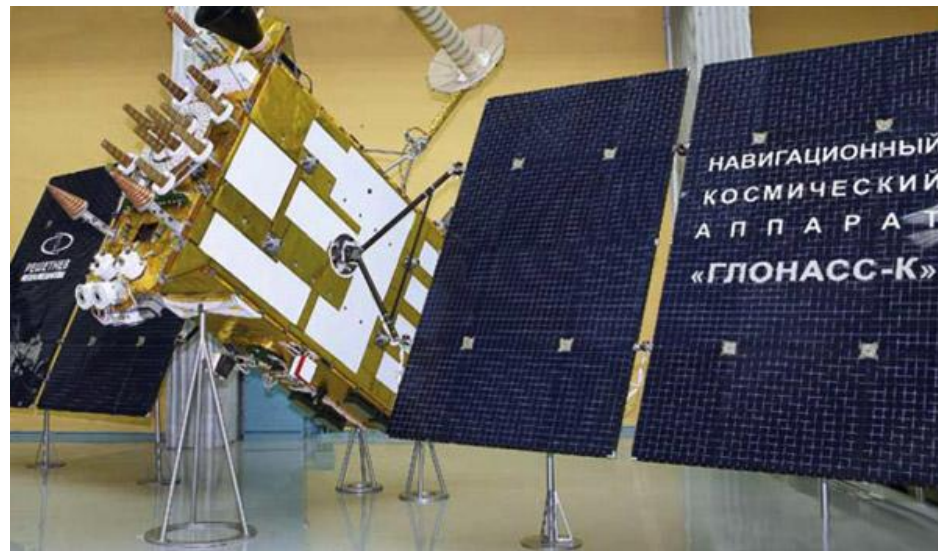
В настоящее время перспективными считаются негерметичные СОТР, имеющие меньшую массу и обеспечивающие более длительное время эксплуатации КА.

В состав СОТР входят средства регулирования внешнего теплообмена, чувствительные элементы, управляющий блок, исполнительные органы.



Проектирование системы обеспечения теплового режима

Виды СОТР и их состав





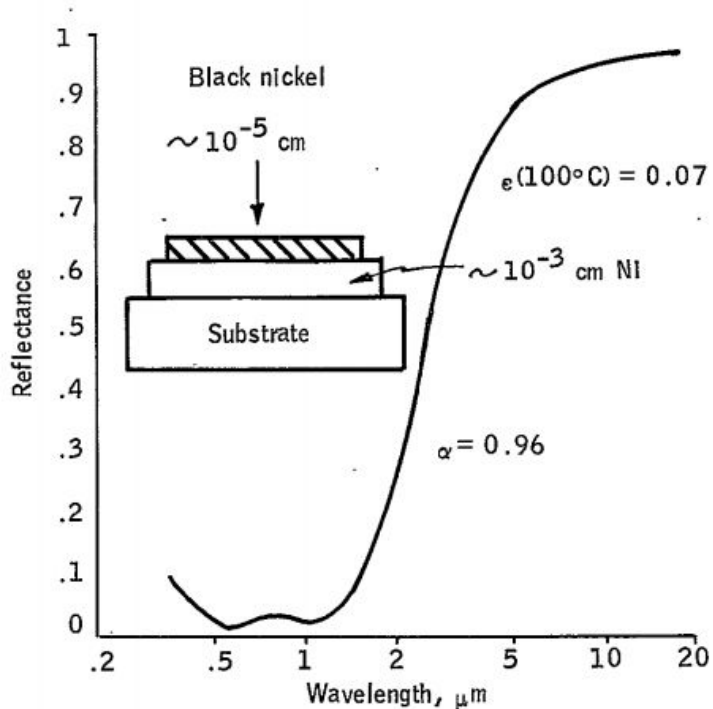
Средства регулирования внешнего теплообмена

2. Конвекция. Закон Ньютона-Рихмана. Количество теплоты Q в процессе конвективного теплообмена пропорционально площади поверхности теплообмена F и разности температур поверхности t_n и среды t_{cp} :

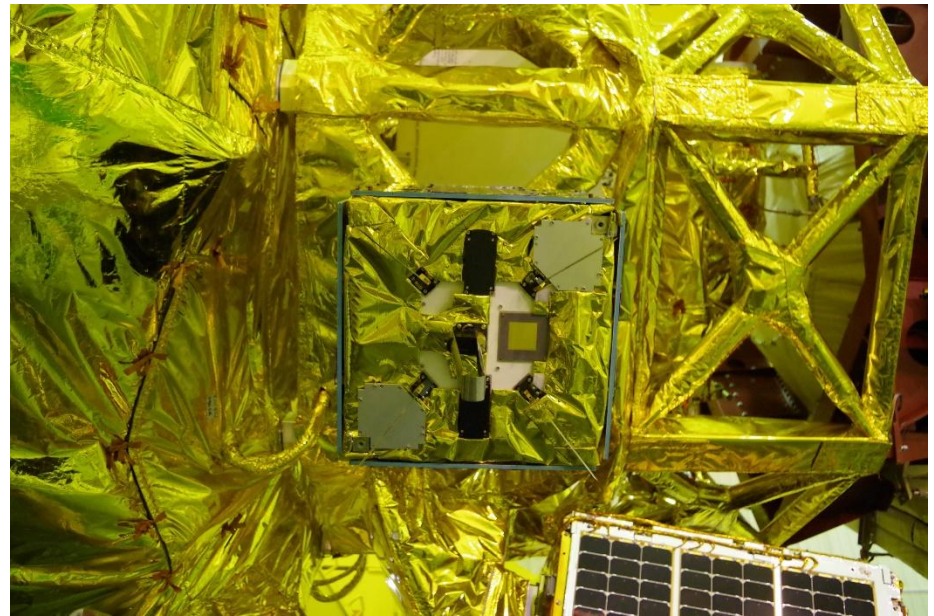
$$Q = \alpha F (t_n - t_{cp})$$

В процессе теплоотдачи независимо от направления теплового потока Q значение его можно считать положительным, поэтому разность $t_n - t_{cp}$ берут по абсолютной величине. Коэффициент пропорциональности α называется коэффициентом теплоотдачи; его единица измерения Вт/(м²·К).

Средства регулирования внешнего теплообмена



Пример спектральной зависимости коэффициента отражения терморегулирующего покрытия «черный никель»



Пример использования эмали ЭКОМ-1 на космическом аппарате DX1



Средства регулирования внешнего теплообмена

Экранно-вакуумная теплоизоляция (ЭВТИ) – теплоизоляция, состоящая набора экранов с заданными термооптическими свойствами. Снижение интенсивности лучистого теплообмена защищаемого ЭВТИ объекта производится за счет организации прохождения излучения через набор последовательно расположенных экранов. Проходя через экраны, излучение частично отражается, частично поглощается, вызывая нагрев экрана. Увеличивая количество экранов на пути излучения, можно увеличить долю отраженного излучения и снизить долю проходящего.



Средства регулирования внешнего теплообмена



Структура слоев ЭТИ



КА «Спектр-Р»



Прибор ЛЕНД в ЭТИ



Средства регулирования внешнего теплообмена

2. Конвекция. Закон Ньютона-Рихмана. Количество теплоты Q в процессе конвективного теплообмена пропорционально площади поверхности теплообмена F и разности температур поверхности t_n и среды t_{cp} :

$$Q = \alpha F (t_n - t_{cp})$$

В процессе теплоотдачи независимо от направления теплового потока Q значение его можно считать положительным, поэтому разность $t_n - t_{cp}$ берут по абсолютной величине. Коэффициент пропорциональности α называется коэффициентом теплоотдачи; его единица

$$q_{1-2}^{np} = \varepsilon_{1-2}^{np} \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1)$$

$$\text{где } \varepsilon_{1-2}^{np} = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - \frac{1}{2} \right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - \frac{1}{2} \right)}$$



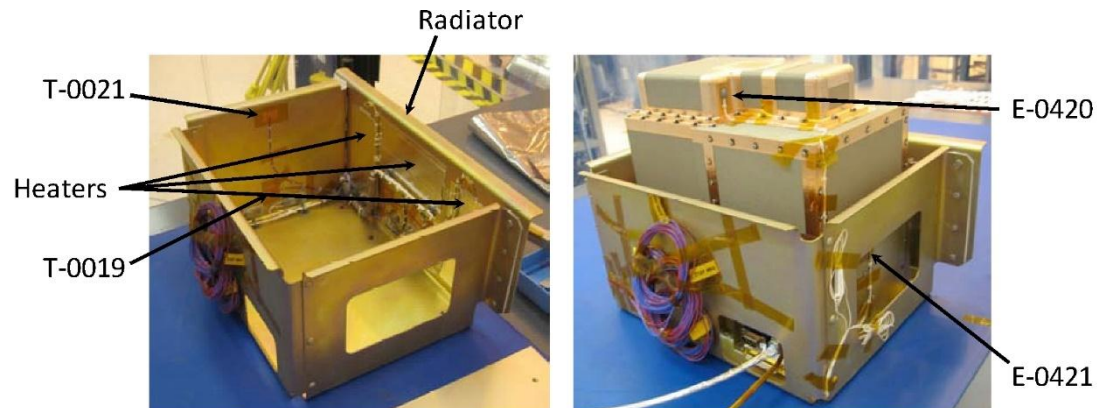
Средства регулирования внешнего теплообмена

Приведенная степень черноты в системе из N одинаковых экранов записывается в виде:

$$\varepsilon_N^{np} = \frac{1}{(N-1) \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon} - \frac{1}{2} \right)} \quad (2)$$

Чувствительные элементы СОТР

В качестве чувствительных элементов СОТР, предназначенных для измерения температуры, на борту КА используют термопары и терморезисторы в аналоговом и цифровом исполнении.



Размещение терморезисторов на корпусе детектора GRaND AMC Dawn



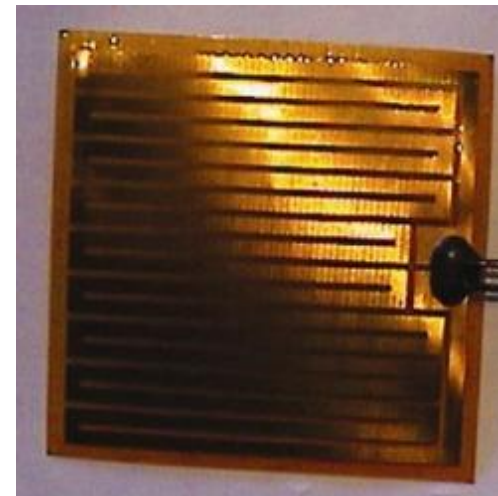
Законы управления СОТР

Блок управления СОТР на основе реализуемой в нем программы и данных, поступающих от чувствительных элементов, должен осуществлять управление исполнительными органами, включающими в свой состав электрические нагреватели, теплообменные контуры и тепловые трубы, а также радиаторы.



Устройство исполнительных органов СОТР

Электрические нагреватели - устройства, выделяющие теплоту при пропускании через них электрического тока. Достоинства – малая масса, дешевизна, простота регулирования выделяемой тепловой мощности



Примеры конструктивного исполнения электрических нагревателей



Устройство исполнительных органов СОТР

Тепловые трубы - теплопередающее устройство, способное передавать большие тепловые мощности при малых градиентах температуры. Представляет собой герметичную конструкцию, частично заполненную жидким теплоносителем. В нагреваемой части (в зоне нагрева, или зоне испарения) жидкий теплоноситель испаряется с поглощением теплоты, а в охлаждаемой (зоне охлаждения, или зоне конденсации) - пар, перетекающий из зоны испарения, конденсируется с выделением теплоты.

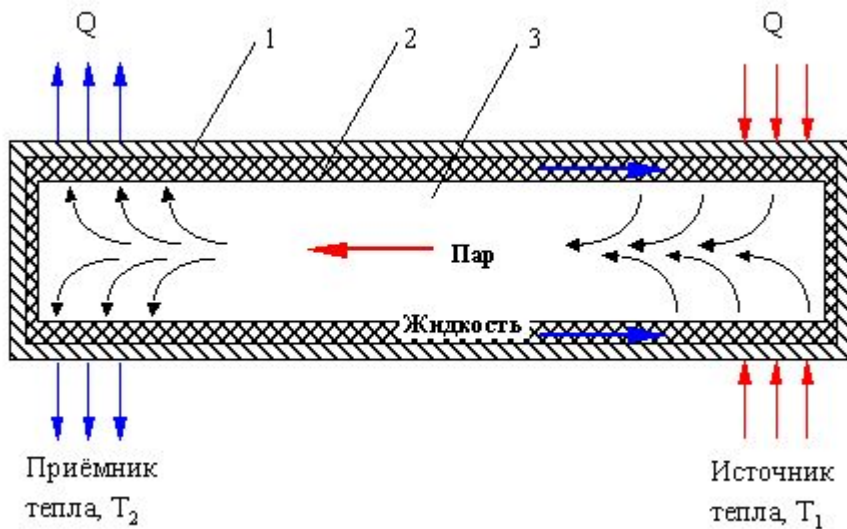


Устройство исполнительных органов СОТР

Движение пара происходит за счёт разности давлений насыщенного пара, определяемой разностью температур в зонах. Возвращение жидкости в зону испарения осуществляется либо за счёт внешних воздействий (силы тяжести, насоса), либо под действием разности капиллярных давлений по капиллярной структуре (фитилю), расположенной чаще всего на стенках. Тепловые трубы с капиллярной структурой для возврата жидкости могут работать независимо от внешних воздействий, именно этот тип тепловых труб наиболее распространён.



Устройство исполнительных органов СОТР



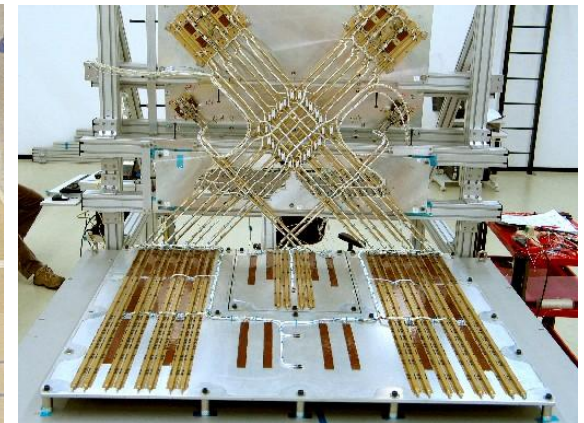
Принцип действия и пример поперечного сечения тепловой трубы



Проектирование системы обеспечения теплового режима

Устройство исполнительных органов СОТР

Радиатор – устройство для поглощения или испускания тепловой энергии. В зависимости от назначения радиатора, поглощение или испускание теплоты, его внешние поверхности покрывают теми или иными термооптическими покрытиями.



Примеры исполнения радиаторов различного назначения и соединения радиатора с приборами на борту КА



Циклограмма работы и режимы ориентации

Циклограмма работы космического аппарата — последовательность команд, исполняемых бортовым комплексом работы, приводящая к изменению параметров работы бортовых систем.

Часто циклограмма записывается в виде последовательности работы КА в том или ином режиме, а также продолжительности работы в заданном режиме.

В плане СОТР, записываются режимы работы и ориентации КА и указывается время в работы в том или ином режиме.



Проектирование системы обеспечения теплового режима

Циклограмма работы и режимы ориентации

Компонент	Тепловыделение, Вт						
	Стабилизация	Безопасный режим	Солнечная ориентация	Съемка	Обработка	Сеансный режим (Ка)	Сеансный режим (УКВ)
Камера	0,0	0,0	0,0	11,6	8,0	2,0	2,0
Передатчик Ка-диапазона	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	14,2	0,0
БКУ	0,7	0,7	1,9	6,2	3,9	7,9	6,8
СЭС	0,4	0,2	0,7	2,8	2,0	3,9	1,5
Встроенная в СБ электроника	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
СБ всего	1,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Итого	3,0	1,5	3,2	21,1	14,4	28,5	10,8

Пример описания режимов работы КА с указанием тепловыделения по приборам



Методика проектирования СОТР

0. Участие в компоновке КА.
1. Сбор сведений о допустимых температурах элементов конструкции КА и его бортовой аппаратуры.
2. Сбор сведений о режимах работы КА, в том числе, и во время наземной подготовки и выведения на РН.
3. Сбор сведений о режимах ориентации КА.
4. Выбор режимов работы КА с минимальным и максимальным внутренними тепловыделениями.
5. Выбор режимов ориентации с наименьшим и наибольшими внешними теплопритоками.



Методика проектирования СОТР

6. Анализ возможных сочетаний режимов работы и ориентации, приводящих к перегреву или переохлаждению.
7. Выбор расчетных случаев на перегрев и переохлаждение.
8. Расчет теплового режима КА.
9. Анализ результатов расчета.
10. Выработка рекомендаций по изменению режимов работы КА, режимов его ориентации, конструкции и мест расположения чувствительных элементов и исполнительных органов.



Оценка площади радиатора и мощности нагревателей

Оценку площади радиаторов КА, их термооптических характеристик и суммарной мощности электрических нагревателей можно с помощью так называемого одноузлового приближения, путем замены всего КА изотермическим элементом с требуемым тепловыделением.



Оценка площади радиатора и мощности нагревателей

В этом случае уравнение теплового баланса можно записать в следующем виде (3):

$$Q_{КА} + Q_{нагр} + Q_{внеш} - Q_{рад} = 0 \quad (3)$$

$Q_{КА}$ тепловыделение КА в одном из режимов, Вт

$Q_{нагр}$ тепловыделение нагревателей, Вт

$Q_{внеш}$ внешние теплопритоки, Вт

$Q_{рад}$ теплосток с радиатора, Вт



Оценка площади радиатора и мощности нагревателей

Оценка площади радиатора проводится с помощью расчета перегрева КА. Для этого проводится анализ комбинаций режимов работы КА $Q_{КА}$ и внешних теплопритоков $Q_{внеш}$ с целью выявления случая наибольших суммарных теплопритоков. При этом нагреватели считаются выключенными.

В этом случае уравнение (3) записывается в виде (4):

$$Q_{КА}^{\max} + Q_{внеш}^{\max} - Q_{рад}^{\max} = 0 \quad (4)$$



Оценка площади радиатора и мощности нагревателей

В уравнении (4):

$Q_{КА}^{\max}$, $Q_{внеш}^{\max}$ внутреннее тепловыделение и внешний теплоприток, дающие максимальный суммарный теплоприток

$$Q_{рад}^{\max} = S_{рад} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\max}^4 \quad (5)$$

$S_{рад}$ площадь радиатора, м² ε Степень черноты радиатора

σ Коэффициент в законе Стефана-Больцмана, Дж/(с м² К⁴) T_{\max} Максимально допустимая температура КА, К



Оценка площади радиатора и мощности нагревателей

В простейшем случае полета на значительном удалении от небесных тел и постоянной солнечной ориентации максимальный внешний теплоприток

$Q_{внеш}^{\max}$ рассчитывается по формуле (6):

$$Q_{внеш}^{\max} = S_{КА} \cdot A_s \cdot q_s^{\max} \quad (6)$$

$S_{КА}$ площадь поперечного сечения частей КА, освещаемых Солнцем, м²

A_s коэффициент поглощения солнечного излучения

q_s^{\max} максимальная плотность потока солнечного излучения, Вт/м²



Оценка площади радиатора и мощности нагревателей

Подставив (5) и (6) в (4) можно получить необходимое значение площади радиатора и степени его черноты.

Аналогичным образом вычисляется и необходимая мощность нагревателя:

$$Q_{KA}^{\min} + Q_{нагр} + Q_{внеш}^{\min} - Q_{рад} = 0 \quad (7)$$

Q_{KA}^{\min} , $Q_{внеш}^{\min}$ внутреннее тепловыделение и внешний теплоприток, дающие минимальный суммарный теплоприток

$$Q_{рад}^{\min} = S_{рад} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{\min}^4 \quad (8)$$



Оценка площади радиатора и мощности нагревателей

T_{\min} Минимально допустимая температура КА, К

$$Q_{\text{внеш}}^{\min} = S_{KA} \cdot A_s \cdot q_s^{\min} \quad (9)$$

q_s^{\min} минимальная плотность потока солнечного излучения, Вт/м²

Подставив (8) и (9) в (7) можно получить необходимую мощность нагревателя.



Список литературы

1. Малоземов В.В. «Тепловой режим космических аппаратов», М.: Машиностроение, 1980. - 232 с.
2. Елисеев В.Н. «Лекции по курсу «Тепловые режимы летательных аппаратов», М: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 181 с.



Спасибо за внимание

Кафедра СМ-1 «Космические аппараты и ракеты-носители»

107005, Москва, Госпитальный переулок, дом 10

E-mail: kafsm1@sm.bmstu.ru

Телефон: +74992610107