

ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ КРИОМОДУЛЕЙ АППАРАТУРЫ ИНФРАКРАСНОГО НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Красночуб Е.К.

Центральное специализированное конструкторское бюро, г. Самара

Криомодуль представляет собой вакуумированный, высокогерметичный (при нормальном давлении) охлаждаемый отсек, предназначенный для размещения фотоприемного устройства инфракрасного излучения (ФПУ-ИК) системы приема и преобразования информации инфракрасного излучения (СППИ-ИК), аппаратуры наблюдения космического аппарата. Конструкция криомодуля обеспечивает размещение охлаждаемого светофильтра, узла матричных (линейных) фоточувствительных элементов (ФЧЭ) и узла коммутаторов с необходимыми шлейфами и гермопереходами. При этом обеспечиваются передача (с минимальными потерями) потоков холода на температурные уровни матриц (линеек) ФЧЭ и коммутаторов (выходных регистров) и охлаждаемого светофильтра, тепловая развязка уровней охлаждения друг от друга и от более теплых элементов СППИ-ИК; оптическаястыковка матриц (линеек) ФЧЭ с оптико-электронным телескопическим комплексом КА через входное окно (иллюминатор), входящее в состав криомодуля.

Задача теплового расчета криомодуля состоит в определении температуры и тепловых потоков в элементах конструкции криомодуля, а также в определении тепловой нагрузки, отводимой от криомодуля криогенной системой на температурных уровнях. Эти данные позволяют наметить конструктивные изменения, необходимые для обеспечения работоспособности ФПУ-ИК при уменьшении тепловой нагрузки на бортовую криогенную систему охлаждения (БКО).

Как правило, рассматриваются два стационарных тепловых режима криомодуля СППИ-ИК: дежурный и рабочий.

В дежурном режиме нет собственных тепловыделений линеек (матриц) ФЧЭ, коммутаторов, температура элементов и теплопритоки к криогенной системе определяются граничными условиями, конструктивными и теплофизическими характеристиками элементов криомодуля.

В рабочем режиме включаются активные источники тепловыделения: линейки (матрицы) ФЧЭ и коммутаторы. Предполагается, что собственные тепловыделения ФПУ-ИК равномерно распределены по длине платформы приемников и коммутаторов

В результате проведения обобщенного анализа результатов расче-

тов тепловых нагрузок (выполненных различными организациями) от криомодуля на криогенные уровни БКСО на дежурном режиме работы ФПУ-ИК могут быть рекомендованы следующие расчетные зависимости для определения тепловых нагрузок на нижний $T_{\text{н}} = 20-40$ К и верхний $T_{\text{в}} = 80$ К криогенные уровни БКСО в зависимости от длины фоточувствительной зоны,

$L = 220-500$ мм, в дежурном режиме работы ФПУ-ИК:
для тепловой нагрузки на нижнем криогенном уровне БКСО

$$Q_{\text{n}} = 0,004 \cdot L - 0,337, \quad (1)$$

для тепловой нагрузки на верхнем криогенном уровне БКСО

$$Q_{\text{в}} = 0,011 \cdot L + 1,77, \quad (2)$$

для суммарной тепловой нагрузки на криогенные уровни БКСО

$$Q_{\text{n+v}} = 0,015 \cdot L + 1,107, \quad (3)$$

При разработке криомодулей были использованы все известные способы и технические решения по уменьшению теплопритоков к элементам криомодуля и к БКСО.

Для определения тепловых нагрузок на криогенные уровни БКСО в рабочем режиме работы ФПУ-ИК к соответствующим тепловым нагрузкам на БКСО в дежурном режиме работы ФПУ-ИК добавляются собственные тепловыделения коммутаторов и ФЧЭ.

На выбор температуры внутренней поверхности фонозащитной бленды (корпуса) криомодуля СППИ-ИК влияют два фактора. С одной стороны, внутренние поверхности бленды являются излучателями, создающими фоновую облученность ФЧЭ ФПУ-ИК. Фоновая облученность приводит к снижению основного показателя КА - температурного разрешения. Наряду с этим, фоновая облученность обуславливает фотонные токи ФЧЭ ФПУ-ИК, что должно учитываться при разработке алгоритмов обработки информационных сигналов. В силу этих обстоятельств целесообразно, по возможности, снижать температуру внутренней полости криомодуля. С другой стороны, не целесообразно предъявлять излишне жесткие требования к температурному режиму криомодуля, так как это ведет к усложнению системы охлаждения криомодуля, к ухудшению её энергетических и габаритно-массовых показателей, повышению её стоимости. Поэтому рабочую температуру внутренней полости криомодуля целесообразно принять равной той величине, при которой потери в тепловом информационном показателе не превышают допустимой величины.

В качестве допустимого предлагается уровень потерь в 3% по температурному разрешению. Если учесть, что ФПУ-ИК работает в режиме ограничения фона, то можно принять, что уровень фоновой облученности

от внутренних стенок криомодуля должен составлять величину не более ~ 10% от фоновой облученности, создаваемой другими источниками

Фоновую облученность в фокальной плоскости криомодуля определяют следующие основные источники излучения: подстилающая поверхность; восходящее излучение атмосферы; элементы оптической системы в рабочей апертуре; элементы конструкции вне рабочей апертуры, попадающие в поле зрения; оправа вторичного зеркала (для двухзеркальной оптической системы); внутренние поверхности криомодуля

Первые пять источников фона по характеру их спектров излучения весьма близки друг к другу. Максимум спектральной плотности их излучения лежит вблизи 10 мкм. Составляющая фона, обусловленная излучением внутренних поверхностей криомодуля, существенно отличается от остальных своим спектральным составом. Основная часть спектра излучения стенок криомодуля лежит за пределами рабочего спектрального диапазона. Поэтому влияние криомодуля может быть определено по выходной реакции фотоприемника.

Линейное разрешение на местности R определяется формулой

$$R = \frac{1}{2v_0} \cdot \frac{H}{f'} \quad (4)$$

где v_0 - рабочая пространственная частота системы в фокальной плоскости аппаратуры наблюдения, H - высота полета КА, f' - фокусное расстояние оптической системы.

Для одной и той же оптической системы при одинаковой высоте полета КА и различных температурах криостатирования внутренней поверхности криомодуля имеем

$$\bar{R} = \frac{R(T_{kp1})}{R(T_{kp2})} = \frac{v_0(T_{kp2})}{v_0(T_{kp1})} \quad (5)$$

Значения v_0 определяются в процессе расчета оптического тракта аппаратуры ИК-наблюдения. Относительные линейные разрешения \bar{R} определялись как функции температуры криостатирования внутренней поверхности криомодуля оптической системы ИК-наблюдения со следующими характеристиками и условиями наблюдения:

- оптическая система - двухзеркальный ИК-телескоп;
- диаметр первичного зеркала $D = 1,2$ м;
- фокусное расстояние $f' = 12$ м;
- неселективный коэффициент пропускания оптического тракта до светофильтра $\tau_{opt} = \tau_{tp} = 0,5$;

- коэффициент экранирования первичного зеркала $\mu_1 = 0,4$;
- спектральное пропускание светофильтра $\tau_\phi(\lambda) = 0,8$;
- приемники излучения на основе InSb и $\text{Si} <\text{Ga}>$;
- размеры фотоприемников - $d_x \times d_y = 30 \times 30 \text{ мкм}^2$;
- температура конструкции $T_m = 300 \text{ K}$.

Условия наблюдения:

- высота полета КА - 300-500 км;
- степень черноты подстилающей поверхности $\epsilon_\phi = 0,9$;
- температура фона - зима $T_\phi = 261 \text{ K}$, лето $T_\phi = 293 \text{ K}$.

Проведенные расчеты показывали, что для выбранной оптической системы ($D = 1,2 \text{ м}$, $f = 12 \text{ м}$, $\delta_1 = 50 \times 50 \text{ мкм}^2$, $\delta_2 = 30 \times 30 \text{ мкм}^2$) температура внутренней поверхности криомодуля может быть задана более 80 К. При наблюдении в диапазоне длин волн $\lambda_1 = 3\text{-}5 \text{ мкм}$ при худшем (на 3%) линейном разрешении на местности температура внутренней поверхности криомодуля может быть принята равной 180-190 К, при длинах волн $\lambda_2 = 8\text{-}12 \text{ мкм}$ эта температура может быть выбрана на уровне 100-110 К. При том же ухудшении линейного разрешения на местности (на 3%) при наблюдении высококонтрастных объектов ($\Delta T = 5 \text{ K}$) температура внутренней поверхности криомодуля может быть увеличена на $\sim 10 \text{ K}$, что не требуется при наблюдении низкоконтрастных объектов, $\Delta T = 1 \text{ K}$.

Обеспечение более высокого значения температуры внутренней поверхности криомодуля снижает требования к БКСО по температуре на верхнем криогенном уровне, что, в конечном итоге, может привести к улучшению энергомассовых показателей БКСО и КА, а также применению в составе БКСО радиационных холодильников, использующих непосредственно для своей работы холод космического пространства.

Выводы:

Рассмотрены тепловые расчеты криомодулей аппаратуры ИК-наблюдения космических аппаратов. Предложены расчетные зависимости для определения тепловых нагрузок от криомодуля на криогенные уровни БКСО $T_{hy} = 20\text{-}40 \text{ K}$ и $T_{by} = 80 \text{ K}$ в зависимости от длины фоточувствительной зоны $L = 220\text{-}500 \text{ мм}$ на дежурном и рабочем режимах работы ФПУ-ИК. Показано, что температура внутренней поверхности криомодуля может быть задана более 80 К, что снижает требования к тепловым нагрузкам БКСО и тем самым может привести к улучшению энергомассовых показателей БКСО и космического аппарата.