

Шуленов А.И., Абрашкин А.В.

РАЗМЕЩЕНИЕ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА В ОТСЕКАХ МАЛОГАБАРИТНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

При размещении бортового оборудования в отсеках минимального объема в процессе проектирования малогабаритных космических аппаратов (КА) возникает необходимость жесткого контроля теплового режима, который в значительной степени определяет надежность функционирования бортового оборудования (БО). При этом уменьшение габаритов и размеров КА в целом вступают в противоречие с тепловым критерием через надежность. В связи с этим весьма важно, чтобы при разработке математической модели автоматизированного размещения БО, кроме конструктивных и технологических ограничений учитывался и тепловой режим.

Тепловой режим отсека определяется состоянием внутренней среды отсека и источниками тепла, в качестве которых выступают отдельные приборы или блоки.

Рассматривается математическая постановка и метод решения задачи поиска "плотных" компоновок путем рационального размещения БО внутри герметичных замкнутых отсеков с учетом ограничений на максимальное значение температурного поля и местоположение приборов.

Проектируемый отсек и приборы описаны уравнениями не выше второго порядка.

При размещении БО образуются зазоры как между корпусом отсека и приборами, так и между самими приборами, представляющими каналы, по которым происходит движение охладителя. Для получения "плотных" компоновок необходимо минимизировать размеры каналов. При этом необходимо, чтобы максимальное изменение температуры не превышало наперед заданной величины.

В общем случае задача может быть представлена в терминах нелинейного программирования в следующем виде:

$$F = \text{opt } f(u_i); \quad i = 1, \dots, n;$$

$$\text{при ограничениях: } v(u_i) \leq 0;$$

$$\varphi(u_i) + b \leq 0;$$

$$\max T(u_i) \leq t^*; \quad u_i \in G.$$

Здесь F — функция цели; u — вектор параметров размещения; v и φ — ограничения на размещение; T — температурное поле; t^* — максимально допустимое температурное поле; n — число приборов; G — область допустимых решений.

Температурное поле $T(x, y, z, t)$ может быть описано нестационарным уравнением теплопроводности:

$$C \rho \frac{dT}{dt} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} T) + Q$$

с соответствующими краевыми условиями в каждой из рассматриваемых областей; уравнениями Навье — Стокса, неразрывности и энергии в охладителе.

Здесь C — удельная теплоемкость материала; ρ — плотность; $Q(x, y, z, t)$ — выделяемая мощность; λ — коэффициент теплопроводности.

В общем случае функция цели и ограничения являются нелинейными функциями. Область определения функции цели является многосвязной, а задача — многоэкстремальной, относящейся к классу задач нелинейного математического программирования специального вида.

Для данного класса задач существенным является то, что функция F имеет большую размерность параметров, а T не имеет аналитической зависимости от оптимизируемых параметров. Кроме того, сама задача определения температурного поля является многомерной задачей математической физики. В связи с этим имеются следующие основные трудности в решении задачи размещения:

- разработка метода и алгоритма поиска минимальных зазоров с учетом особенностей рассматриваемой задачи;
- разработка метода определения температурного поля.

Как показывает практика проектирования компоновок приборных отсеков, движение газа внутри них при малых скоростях можно считать ламинарным. Учитывая, что процесс теплообмена является относительно медленно протекающим, можно принять, что температура в зазорах определяется температурой поверхности конструкции приборов. И поскольку длина канала гораздо больше размера зазоров, то поле скоростей газа в любом сечении канала одинаково. При этом профиль поля скоростей газа меняется во времени. Предполагается также, что направление движения газа параллельно оси зазора, а давление в любой точке постоянно.

С учетом принятых допущений определение температурного поля легко свести к известному решению сопряженных систем контуров, по которым движется охладитель. Расходы газа в каналах, вообще говоря, различны и зависят от размера Z_i зазоров. Они могут быть

определены на основании принятых допущений с помощью приближенного решения уравнений Навье-Стокса во всей области на каждом шаге по времени с учетом полученного размещения приборов.

Компонование приборов с учетом тепловых явлений требует на каждом шаге размещения определения расходов газа в зазорах:

$$W = \rho \int_0^z v(u_i) du,$$

Здесь $v(u_i)$ — профиль скоростей в зазоре Z_i ; i — номер зазора.

Это, в свою очередь предполагает различные варианты размещения приборов.

Решение задачи размещения приборов сводится к известному методу решения многопараметрических задач с многосвязной областью поиска решения.

Используется прием пошагового, последовательно-одиночного размещения, при котором выполняется последовательное размещение приборов один за другим и определяется оптимальное размещение:

$$I^0 = \text{opt } f(u_k^0).$$

Далее используется прием регуляризации и определяется решение в регулярной области без учета ограничений на размещение:

$$I^R = f(u_k^R).$$

Затем полученное решение переводится в область допустимых значений с учетом ограничений на размещение:

$$f_0 = \min \{ I^0, I^R \}.$$

Для полученного решения определяется величина зазора Z_i :

$$Z_i = f_0(T_{n-1}, T_n),$$

представляющая собой наикратчайшее расстояние между приборами.

В случае неопределенности решения по Z_i процесс поиска завершается при выполнении условия:

$$\varepsilon \leq \min \frac{f_0(T_n, T_{n+1}) - f_0(T_{n-1}, T_n)}{f_0(T_n, T_{n+1})},$$

где ε — заданная величина, определяющая точность решения.

Таким образом, оказывается возможным решение задачи автоматизированного размещения БО с учетом теплового режима и получения "плотных" компоновок отсеков малогабаритных (КА).