

СОВМЕСТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ МАССОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ПРИБОРНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ТРЕБУЕМОЙ НАДЕЖНОСТИ

Наталья Сергеевна КУДРЯВЦЕВА родилась в городе Москве. Профессор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области проектирования систем обеспечения теплового режима и систем жизнеобеспечения космических аппаратов. Автор 80 научных работ. E-mail: nkudr@cosmos.com.ru

Natalia S. KUDRIAVTSEVA, D.Sci., was born in Moscow. She is a Professor at the MAI. Her research interests are in spacecraft thermal control system and life-support system design. She has published 80 technical papers. E-mail: nkudr@cosmos.com.ru

Владимир Викторович МАЛОЗЕМОВ родился в 1937 г. в городе Москве. Заведующий кафедрой МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области проектирования систем обеспечения теплового режима и систем жизнеобеспечения космических аппаратов. Автор более 250 научных работ. E-mail: 607@mai.ru

Vladimir V. MALOZEMOV, D.Sci., was born in 1937, in Moscow. He is the Head of a Department at the MAI. His research interests are in spacecraft thermal control system and life-support system design. He has published over 250 technical papers. E-mail: 607@mai.ru

Статья посвящена вопросам совместной оптимизации массовых, энергетических и надежности характеристик СТР и охлаждаемых РЭА для КА с большими продолжительностями полетов и высокими требованиями к надежности. Поскольку надежность функционирования РЭА зависит в основном от температуры охлаждающей среды, то представляет интерес выбор оптимального температурного уровня в СТР при минимальных массоэнергетических характеристиках при обеспечении требуемой надежности.

Предложенный подход позволяет выбирать оптимальную степень резервирования РЭА и оптимальный температурный уровень в СТР при минимальных массовых и энергетических характеристиках.

The article is related to joint optimization problems for mass, power and reliability characteristics of thermal control systems and cooled radio electronic equipment for long-term mission spacecraft with high reliability requirements. As equipment operational reliability depends mainly on cooling medium temperature it is interesting to choose some optimum temperature level at minimum mass and power characteristics under condition of required reliability. The suggested technique allows us to choose optimum equipment redundancy level as well as optimum temperature level for thermal control systems at minimum values of mass and power characteristics.

Ключевые слова: система терморегулирования КА, оптимизация, массоэнергетические характеристики, надежность, радиоэлектронная аппаратура.

Key words: spacecraft thermal control system, optimization, mass and power characteristics, reliability, radio electronic equipment.

Условные обозначения и сокращения

ДФ СТР — двухфазная система терморегулирования;
 ИТО — испарительный теплообменник;
 КТО — конденсатор-излучатель;
 Р — регулятор;
 РЭА — радиоэлектронная аппаратура;
 РТО — радиационный теплообменник;
 СТР — система терморегулирования;
 ТЗ — техническое задание;
 ЧЭ — чувствительный элемент регулятора.

Введение

Обеспечение теплового режима приборного комплекса, состоящего из блоков РЭА, осуществляется СТР КА за счет конвекции, теплопроводности, излучения и испарения. Требования к температуре охлаждающей среды, задаваемые в ТЗ на разработку СТР, как правило, составляют диапазон 273—333 К [1]. Выбор оптимальных проектных параметров СТР, а следовательно, и температуры охлаждающей среды для РЭА традиционно осуществляется из условий обеспечения минимальных массоэнергетических характеристик СТР без учета особенностей функционирования РЭА при различных температурных условиях в заданном диапазоне [1, 2, 3, 4, 5].

Предполагается, что в заданном диапазоне температур РЭА функционируют безотказно с требуемой вероятностью отсутствия сбоев. Однако интенсивности отказов типовых электрорадиоэлементов при их работе в составе РЭА существенно зависят от температуры. При увеличении окружающей температуры интенсифицируются физико-химические процессы в структуре элементов, вызывающие эффект старения. К таким процессам относятся: диффузия, адсорбция, распад твердых растворов, увеличение объемов, трещинообразование, химические реакции, происходящие в структуре однородных тел. Увеличение температуры на каждые 10 градусов в диапазоне 293—313 К приводит к увеличению вероятности отказа блока аппаратуры в среднем в 1,5 раза. Поэтому надежность бортовой аппаратуры существенно зависит от температуры охлаждающей среды.

Требуемая надежность РЭА обеспечивается поэлементным резервированием наиболее нагруженных участков и полным резервированием всего блока. При высоких рабочих температурах нередко имеет место трехкратное резервирование комплексов бортовой аппаратуры. При этом масса и надежность растут не пропорционально. Чем выше должна быть надежность, тем больше возрастает прибавка массы на процент повышения надежно-

сти. Обычно быстро достигается граница, которая определяется максимально допустимой массой полезной нагрузки. Поэтому снижение температуры охлаждающей среды до определенных пределов способствует повышению надежности, что может дать существенный выигрыш в массе всего комплекса охлаждаемого оборудования [6].

В данной статье ставится и решается задача совместной оптимизации массоэнергетических характеристик СТР и охлаждаемого оборудования при обеспечении требуемой надежности. Данная задача представляет особый интерес применительно к беспилотным КА.

Постановка задачи совместной оптимизации массоэнергетических характеристик СТР и охлаждаемого оборудования при обеспечении требуемой надежности

В качестве критерия оптимизации принимается минимизация суммарной приведенной массы СТР и охлаждаемой аппаратуры M , которая выражается целевой функцией:

$$M = M_{СТР}(u_1, \dots, u_r; x_1, \dots, x_m) + M_{АП}(T, n), \quad (1)$$

где $M_{СТР}$ — приведенная масса СТР с учетом дублирования всей системы; (u_1, \dots, u_r) — вектор r конструктивных и (x_1, \dots, x_m) — вектор m режимных параметров СТР (температур, давлений, расходов), которые оказывают влияние на приведенную массу системы; $M_{АП}$ — масса блоков РЭА с учетом поэлементного и (или) полного резервирования; T — средняя температура блоков аппаратуры; n — кратность ненагруженного резервирования аппаратуры.

К дисциплинирующим условиям относятся ограничения на конструктивные и режимные параметры, которые задаются в ТЗ на систему и могут быть выражены функциями g_i в следующем виде:

$$g_i(u_1, \dots, u_r; x_1, \dots, x_m) \leq 0, \quad i = 1, \dots, k, \quad (2)$$

где k — суммарное количество ограничений.

Предположим, что надежность СТР не зависит от температуры охлаждаемого оборудования и обеспечивается за счет дублирования системы.

Зависимость вероятности отказа нерезервированного блока оборудования от температуры представляется в следующем виде:

$$Q(T) = Q_0 \cdot 1,5^{\left(\frac{T-T_0}{10}\right)}, \quad T \geq T_0, \quad (3)$$

где Q_0 — вероятность отказа блока при температуре $T_0 = 293$ К.

Надежность блока аппаратуры P с учетом n -кратного ненагруженного резервирования при температуре T может быть приближенно выражена следующей зависимостью:

$$P(T, n) = 1 - \left[\frac{Q(T)^n}{n!} \right] \quad (4)$$

Тогда ограничение по надежности бортовой аппаратуры имеет вид

$$R - P(T, n) \leq 0, \quad (5)$$

где R — числовое значение надежности, заданной в ТЗ.

Таким образом, задача выбора оптимальных проектных параметров СТР с учетом обеспечения

надежности охлаждаемого оборудования может быть сформулирована следующим образом. Требуется найти такие конструктивные и режимные параметры СТР, температуру аппаратуры T и кратность резервирования аппаратуры n , которые удовлетворяют ограничениям на систему (2) и на надежность блоков РЭА (5) и доставляют минимальное значение целевой функции (1).

Анализ массоэнергетических и надежностных характеристик конвективной СТР и охлаждаемой аппаратуры

Зависимость надежности типовых блоков РЭА от температуры при различной кратности ненагруженного резервирования в соответствии с формулами (3) и (4) представлена на рис. 1 и 2. Из графиков видно, что при температуре выше 293 К происходит резкое падение надежности приборов.

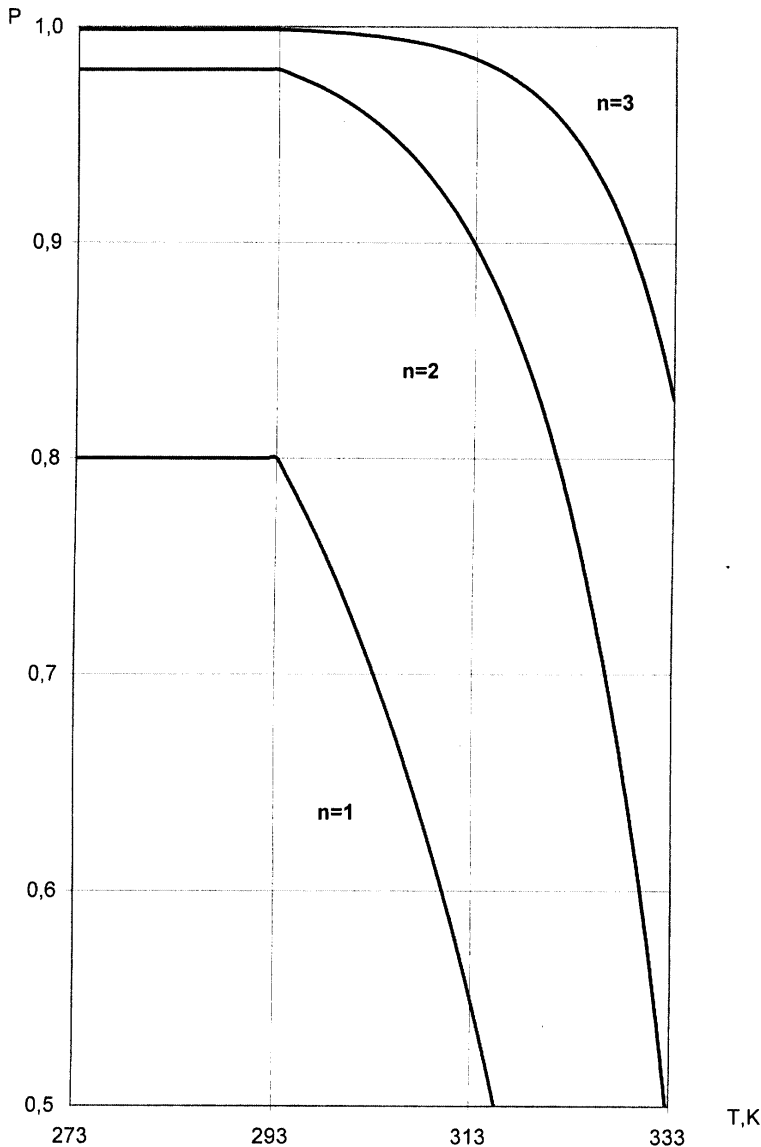


Рис. 1. Зависимости надежности типовых блоков РЭА от температуры при различной кратности n ненагруженного резервирования при $Q_0 = 0,2$

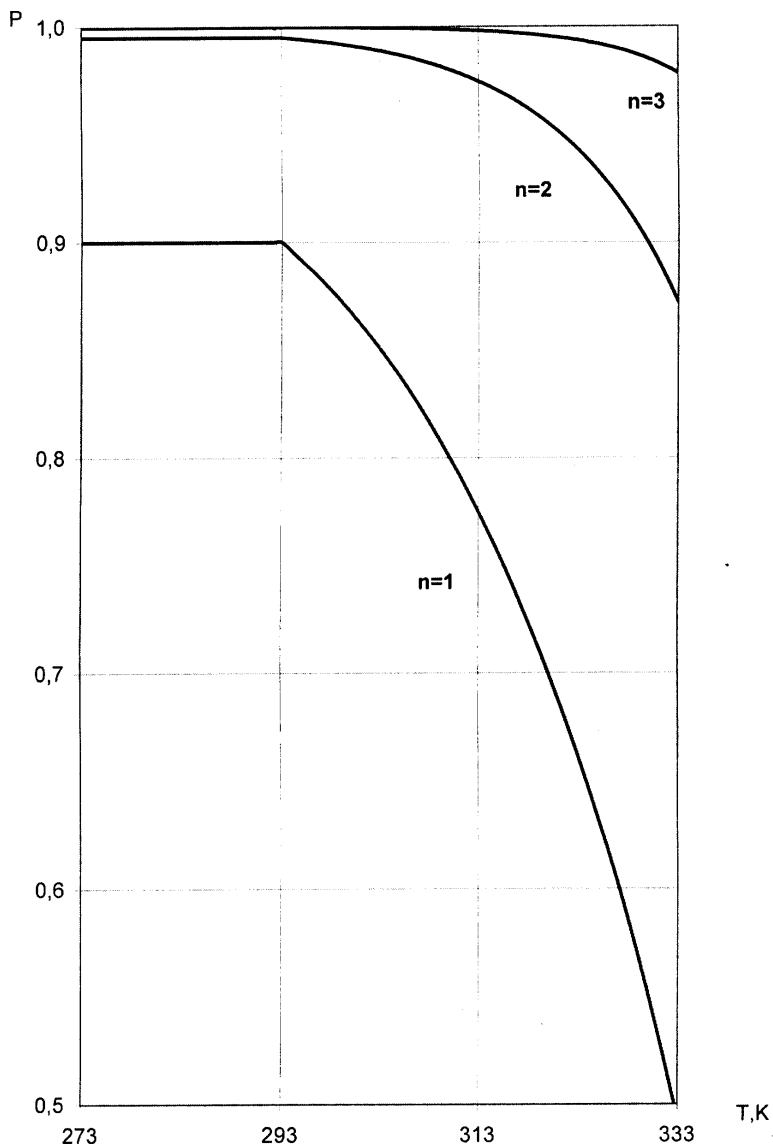


Рис. 2. Зависимости надежности типовых блоков РЭА от температуры при различной кратности n ненагруженного резервирования при $Q_0 = 0,1$

С увеличением кратности резервирования n наблюдается существенное повышение безотказности блоков, но поддержание надежности в пределах 0,90—0,9999 при температурах выше 313—323 К невозможно даже при трехкратном резервировании.

Рассмотрим типовую конвективную СТР, изображенную на рис. 3 и предназначенную для обеспечения теплового режима аппаратуры. На рисунке приняты следующие обозначения: G — расход теплоносителя; $T_{вх}$, $T_{вых}$ — температуры теплоносителя на входе в РТО и на выходе из него; Q — суммарное тепловыделение охлаждаемого оборудования; q_n — удельный внешний тепловой поток, поглощаемый поверхностью РТО.

Исследуем проектные параметры двух вариантов СТР при суммарном внутреннем тепловыделении аппаратуры $Q = 5$ кВт и $Q = 30$ кВт при $q_n = 140$ Вт/м². Указанный теплосъем в системе мо-

жет быть обеспечен на разных температурных уровнях при поддержании температуры приборов в до-

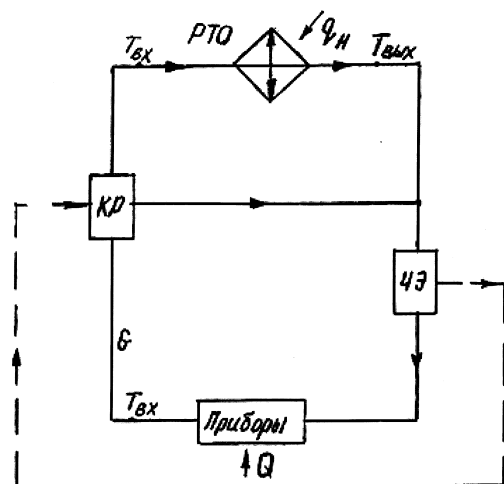


Рис. 3. Схема типовой конвективной СТР

пустимом диапазоне 273—333 К. Чем выше температура излучения РТО, а следовательно, и температура охлаждаемых приборов, тем меньше площадь РТО, а следовательно, и масса СТР. Зависимости площади излучения F от средней температуры теплоносителя, охлаждающего РЭА, представлены на рис. 4, где кривая 1 соответствует $Q = 5$ кВт, а кривая 2 — $Q = 30$ кВт. За единицу принята площадь излучения РТО типовой СТР при $Q = 5$ кВт, равная 25 м^2 . При этом средняя температура приборов будет выше температуры излучения не более чем на четыре градуса. Следует иметь в виду, что приведенная масса СТР зависит от температуры излучения в основном только за счет изменения площади РТО.

Суммарная приведенная масса СТР и охлаждаемой аппаратуры в соответствии с выражением (1) в зависимости от средней температуры теплоноси-

теля изображена на рис. 5 и 6. Рис. 5 соответствует надежности приборов $P = 0,99$, а рис. 6 соответствует $P = 0,999$. Надежность нерезервированных блоков принята равной $P = 0,9$. На обоих рисунках пунктирные кривые соответствуют системе при $Q = 5$ кВт, а сплошные кривые — $Q = 30$ кВт. Приведенная масса СТР изображена кривыми 1, а кривые 2 отражают суммарную приведенную массу СТР и охлаждаемой аппаратуры. За единицу принята приведенная масса типовой СТР при $Q = 5$ кВт, равная 1250 кг . Разрывы в кривых 2 обозначают необходимость увеличения кратности резервирования аппаратуры n с повышением температуры для обеспечения заданной надежности. При уровне надежности $P = 0,999$ даже трехкратное резервирование не может обеспечить требуемую безотказность РЭА при высоких температурах $T > 308 \text{ К}$, что видно из рис. 6.

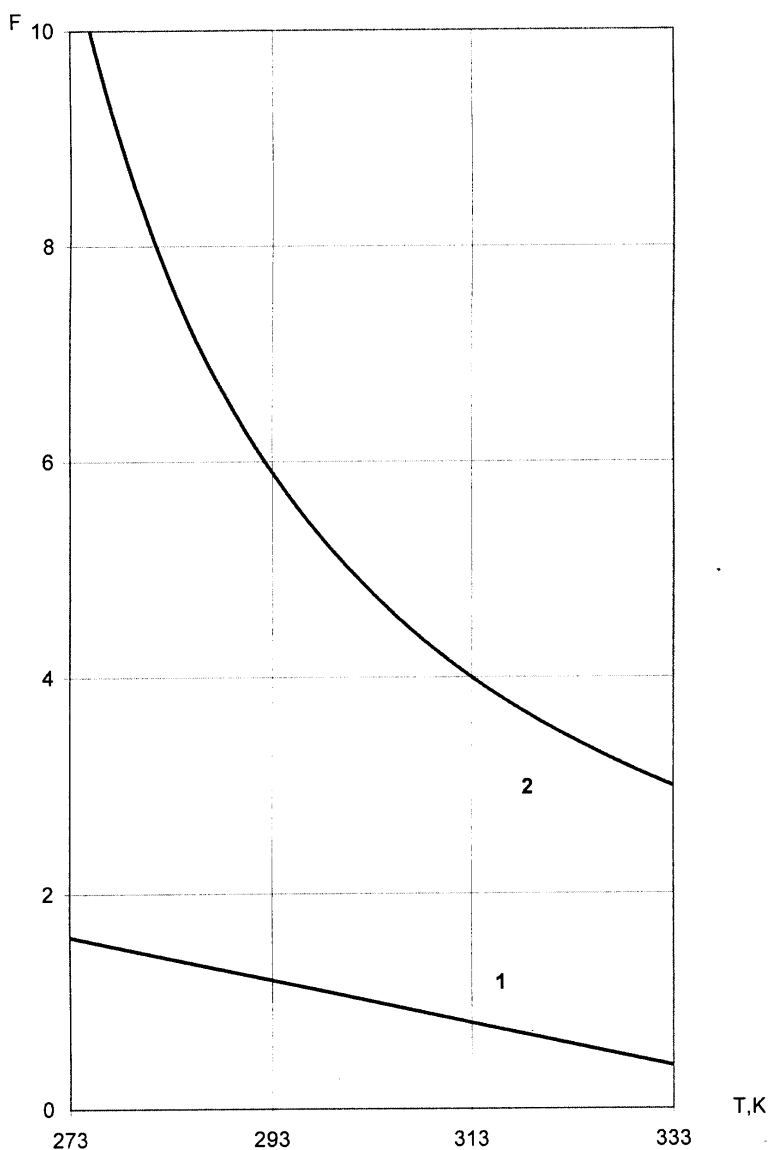


Рис. 4. Зависимости площади излучения РТО F от средней температуры теплоносителя, охлаждающего РЭА, для конвективной СТР: 1 — $Q = 5$ кВт; 2 — $Q = 30$ кВт

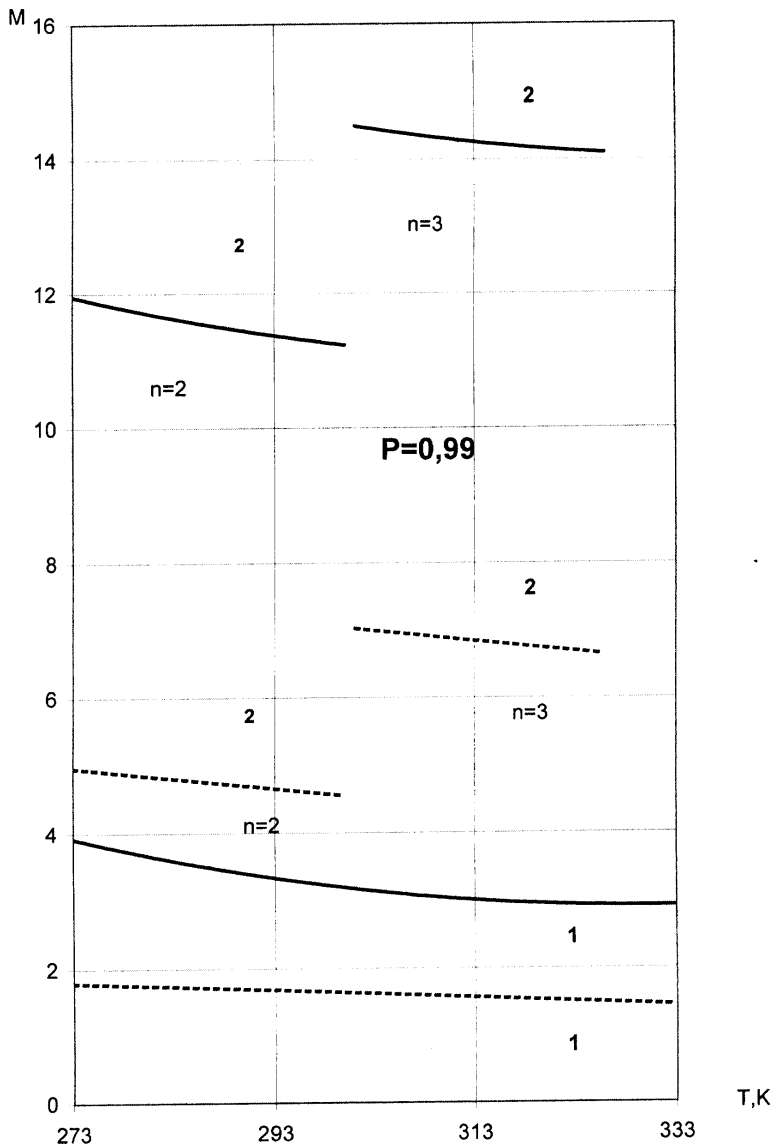


Рис. 5. Зависимости приведенной массы конвективной СТР и РЭА от средней температуры теплоносителя, охлаждающего РЭА, при $P = 0,99$ (пунктирные кривые соответствуют $Q = 5$ кВт, сплошные кривые соответствуют $Q = 30$ кВт): 1 — приведенная масса СТР; 2 — суммарная приведенная масса СТР и РЭА

Из графиков следует, что уменьшение температуры охлаждаемого оборудования дает значительный эффект в уменьшении ее массы за счет сокращения кратности резервирования и небольшое увеличение массы СТР относительно суммарной массы (1). Средняя температура теплоносителя, равная $T = 298$ К, является граничной при выборе оптимальных проектных параметров СТР совместно с обеспечением надежности и минимальной массы РЭА.

Для простоты изложения проведенные расчеты были выполнены в предположении независимости надежности СТР от температурного уровня. В действительности при увеличении площади излучения надежность СТР уменьшается в основном за счет

возрастания метеорной опасности. Это требует увеличения толщины стенки трубок РТО, что ведет к возрастанию массы СТР. Однако указанный дополнительный вклад в суммарную массу СТР и РЭА будет невысоким, что не повлияет на общность результатов анализа.

В статье поставлена и решена задача статической оптимизации параметров СТР и РЭА при постоянном уровне удельного внешнего теплового потока q_n . Следует отметить, что постановка и решение задач динамической оптимизации теплотехнических систем различного назначения показывают, что учет теплоемкости массы системы и охлаждаемого оборудования при переменном по времени тепловом потоке позволяет обеспечить требу-

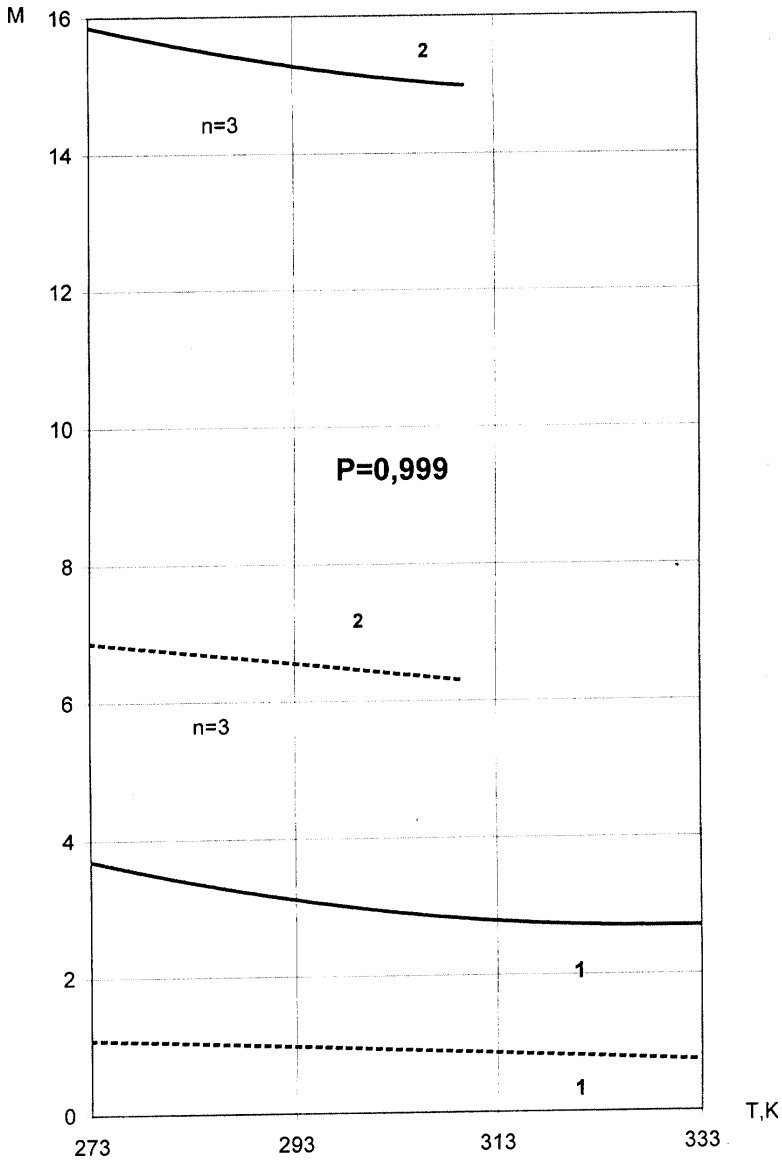


Рис. 6. Зависимости приведенной массы конвективной СТР и РЭА от средней температуры теплоносителя, охлаждающего РЭА, при $P = 0,999$ (пунктирные кривые соответствуют $Q = 5$ кВт, сплошные кривые соответствуют $Q = 30$ кВт): 1 — приведенная масса СТР; 2 — суммарная приведенная масса СТР и РЭА

мый теплосъем на более низком температурном уровне теплоносителя [4,7]. Поэтому для КА на теновой орбите учет динамических процессов теплообмена может явиться дополнительным фактором, приводящим к повышению надежности РЭА.

Анализ массоэнергетических и надежностных характеристик двухфазной СТР и охлаждаемой аппаратуры

Выбор рационального температурного уровня имеет особое значение в связи с проектированием перспективных ДФ СТР. Схема типовой ДФ СТР представлена на рис. 7, где теплота Q от охлаждаемых приборов передается в ИТО.

Зависимость площади излучения КТО от средней температуры стенки ИТО представлена на

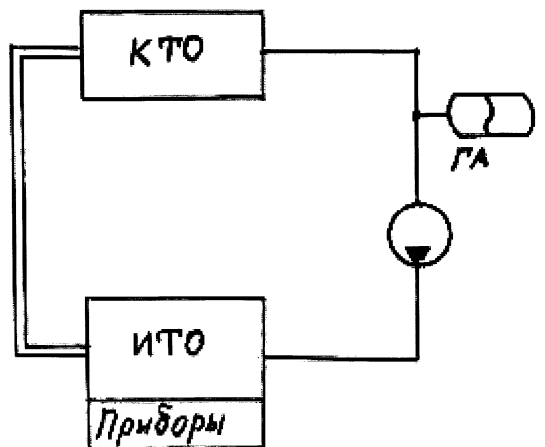


Рис. 7. Схема типовой ДФ СТР

рис. 8. На рис. 9 и 10 представлены графики суммарной приведенной массы СТР и охлаждаемой РЭА (1) от средней температуры стенки ИТО для

вается двух- и трехкратным резервированием целиком всех блоков аппаратуры. Следует иметь в виду возможность поэлементного резервирования наи-

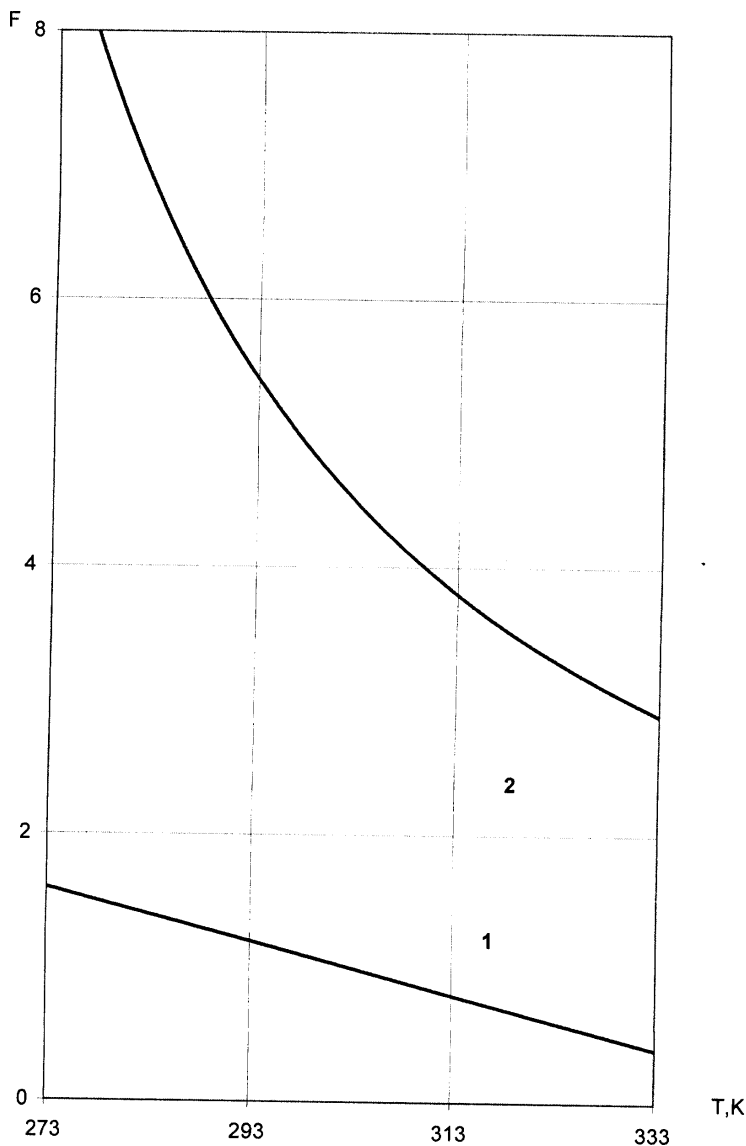


Рис. 8. Зависимости площади излучения КТО F от средней температуры стенки ИТО для ДФ СТР: 1 — $Q = 5$ кВт; 2 — $Q = 30$ кВт

надежности приборов $P = 0,99$ и $P = 0,999$ соответственно. Обозначения на рисунках аналогичны обозначениям на рис. 5 и 6.

Видно, что в случае применения ДФ СТР приведенная масса СТР еще менее зависит от температуры и имеет меньшее значение, чем для конвективной СТР. Это предоставляет дополнительные возможности уменьшения температурного уровня в системе, а следовательно, повышения надежности РЭА и понижения суммарной приведенной массы СТР и охлаждаемого оборудования.

В проведенных расчетах требуемый уровень надежности при различных температурах обеспечи-

вается более теплонагруженных участков, что дает значительно меньшее возрастание массы. Однако, учитывая, что масса охлаждаемой аппаратуры соизмерима или больше массы СТР, выбор проектных параметров СТР следует проводить совместно с обеспечением надежности РЭА в зависимости от температуры из условия минимизации суммарной приведенной массы СТР и охлаждаемой аппаратуры.

Выводы

1. Выбор оптимальных массонергетических характеристик СТР следует осуществлять совместно с обеспечением надежности бортовой РЭА, охлаж-

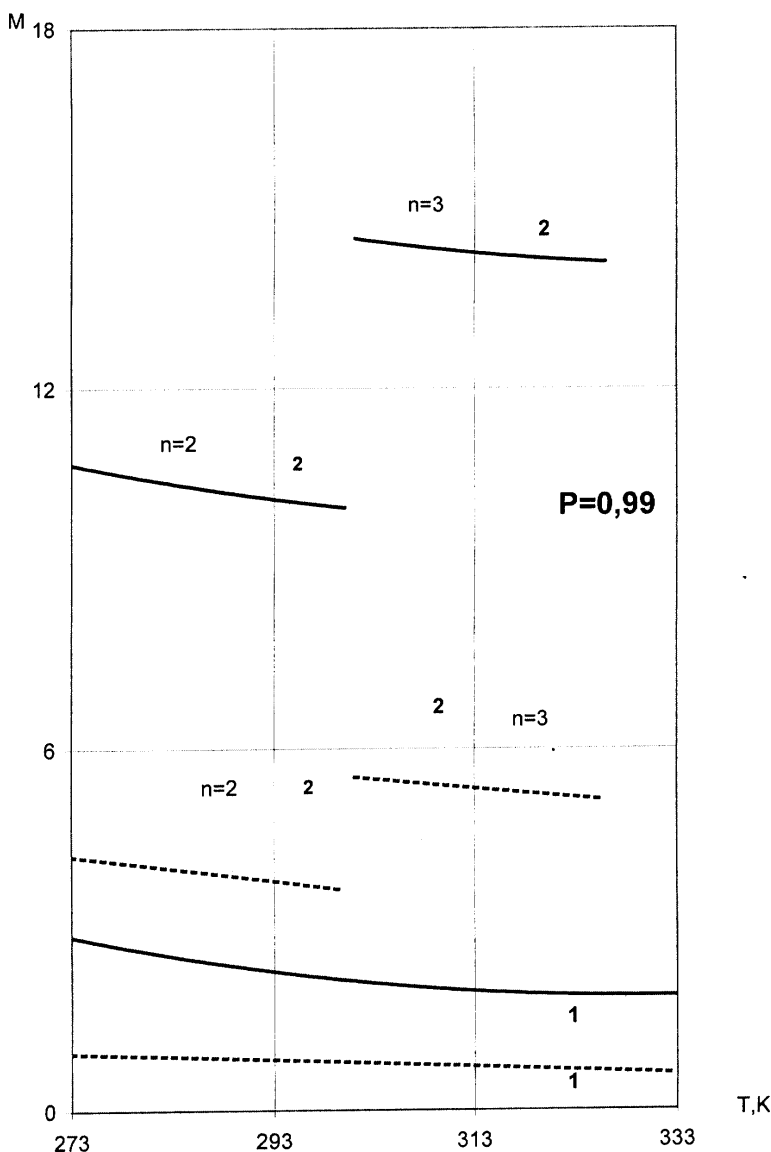


Рис. 9. Зависимости приведенной массы ДФ СТР и РЭА от средней температуры стенки ИТО при $P = 0,99$ (пунктирные кривые соответствуют $Q = 5$ кВт, сплошные кривые соответствуют $Q = 30$ кВт):
 1 — приведенная масса ДФ СТР; 2 — суммарная приведенная масса ДФ СТР и РЭА

даемой СТР. В качестве критерия оптимизации целесообразно принять суммарную приведенную массу СТР и охлаждаемой аппаратуры с учетом резервирования.

2. Диапазон температур 278—298 К является оптимальным для обеспечения высокой надежности РЭА (0,99—0,999) при минимальных массоэнергетических характеристиках СТР и аппаратуры. Увеличение температуры свыше 298 К требует изменения кратности резервирования, что увеличивает массу не менее чем на 50%.

3. Уменьшение температурного уровня в СТР ведет к повышению приведенной массы СТР, что однако оказывает незначительное влияние на суммарную массу СТР и РЭА. Следует иметь в виду, что уменьшение температуры в СТР ограничено су-

ществующими площадями, отводимыми под РТО. Поэтому наиболее предпочтительными следует признать температуры охлаждающей среды 293—298 К, что соответствует средней температуре излучающей поверхности около 291—293 К как для конвективной, так и для двухфазной СТР.

Библиографический список

1. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. — М.: Радио и связь, 1990.
2. Алексеев В.А., Чукин В.Ф., Шишанов А.В. Тепловое конструирование бортовой РЭА на этапе создания электрических схем // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2004. № 4. С. 56—60.

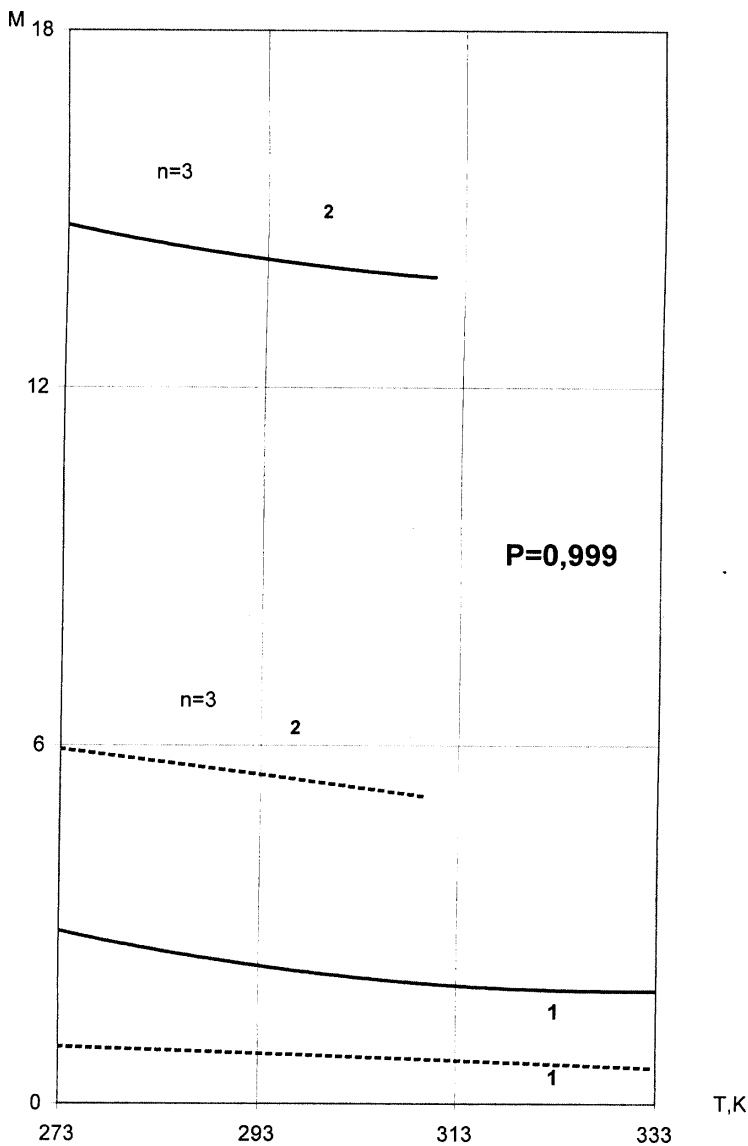


Рис. 10. Зависимости приведенной массы ДФ СТР и РЭА от средней температуры стенки ИТО при $P = 0,999$ (пунктирные кривые соответствуют $Q = 5$ кВт, сплошные кривые соответствуют $Q = 30$ кВт):
 1 — приведенная масса ДФ СТР; 2 — суммарная приведенная масса ДФ СТР и РЭА

3. Шишанов А.В., Алексеев В.А., Чукин В.Ф. Тепловой режим РЭА, размещаемой в негерметичных отсеках и снаружи КА в открытом космосе // Космонавтика и ракетостроение. 2005. № 3. С. 34-40.

4. Малоземов В.В., Кудрявцева Н.С. Оптимизация систем терморегулирования космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1988.

5. Малоземов В.В., Кутепов С.Н., Логинов С.Н. Выбор проектных параметров перспективных систем обеспечения теплового режима ЛА. — М.: Изд-во МАИ, 1989.

6. Malozemov V.V., Kudriavtseva N.S., Alekseev V.A. Joint Optimization of the Thermal Control System and Cooled Instruments Characteristics. SAE Technical Paper Series. 1994. № 941376. 7 p.

7. Кудрявцева Н.С., Малоземов В.В. Оптимизация параметров гелиосистемы горячего водоснабжения // Конверсия в машиностроении. 2008. № 1. С. 54-55.

Московский авиационный институт
 Статья поступила в редакцию 17.10 2008