

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ МАЛОГАБАРИТНОЙ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ

АЛЕКСЕЕВ Владимир Антонович – Научно-исследовательский институт точных приборов, заместитель главного конструктора, д.т.н. Московский авиационный институт (государственный технический университет), профессор
127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51; тел.: 402-95-27; e-mail: vladimir.alekseev@niitp.ru

Vladimir A. ALEKSEEV – Scientific Research Institute of Precision Instruments, deputy chief designer, doctor;
Moscow Aviation Institute (State Technical University), professor
127490, Moscow, Dekabristov street, building 51; phone: 402-95-27; e-mail: vladimir.alekseev@niitp.ru

КУДРЯВЦЕВА Наталья Сергеевна – Московский авиационный институт (государственный технический университет), профессор, д.т.н.
125933, ГСП-3, А-80, Москва, Волоколамское шоссе, 4, МАИ; тел.: 499 158-48-89, 8-495-687-53-07, 8-926-354-31-30; e-mail: nkudr@cosmos.com.ru

Natalia S. KUDRIAVTSEVA – Moscow Aviation Institute (State Technical University), professor, doctor
125933, GSP-3, A-80, Moscow, Volokolamskoye shosse, 4, MAI; phone 499 158-48-89, 8-495-687-53-07, 8-926-354-31-3; e-mail: nkudr@cosmos.com.ru

МАЛОЗЕМОВ Владимир Викторович – Московский авиационный институт (государственный технический университет), заведующий кафедрой, профессор, д.т.н.
125933, ГСП-3, А-80, Москва, Волоколамское шоссе, 4, МАИ; тел.: 499 158-44-77, 8-916-494-74-11; e-mail: 607@mai.ru

Vladimir V. MALOZEMOV – Moscow Aviation Institute (State Technical University), head of a department, professor, doctor
125933, GSP-3, A-80, Moscow, Volokolamskoye shosse, 4, MAI; phone 499 158-44-77, 8-916-494-74-11; e-mail: 607@mai.ru

ПИЧУЛИН Владимир Сергеевич – Московский авиационный институт (государственный технический университет), заместитель заведующего кафедрой, доцент, к.т.н.
125933, ГСП-3, А-80, Москва, Волоколамское шоссе, 4, МАИ; тел.: 499 158-48-89; e-mail: 607@mai.ru

Vladimir S. PICHULIN – Moscow Aviation Institute (State Technical University), deputy head of a department, associate professor, candidate of science.
125933, Moscow, Volokolamskoye shosse, A-80, GSP-3, MAI; phone: 499 158-48-89, e-mail: 607@mai.ru

ТИТОВА Алина Сергеевна – Научно-исследовательский институт точных приборов, инженер
127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51; тел.: 402-95-27; e-mail: dal27@yandex.ru

Alina S. TITOVA – Scientific Research Institute of Precision Instruments, engineer
127490, Moscow, Dekabristov street, building 51; phone: 402-95-27; e-mail: dal27@yandex.ru

ШАНГИН Игорь Александрович – Московский авиационный институт (государственный технический университет), заместитель заведующего кафедрой
125933, ГСП-3, А-80, Москва, Волоколамское шоссе, 4, МАИ; тел.: 499 158-48-89 – раб., 750-32-86 – дом.; e-mail: 607@mai.ru

Igor A. SHANGIN – Moscow Aviation Institute (State Technical University), deputy head of a department
125933, Moscow, Volokolamskoye shosse, A-80, GSP-3, MAI; phone: 499 158-48-89, e-mail: 607@mai.ru

В статье рассматривается математическое моделирование тепловых процессов малогабаритной бортовой аппаратуры (МБА), предназначенной для работы в негерметичных отсеках космических аппаратов. Ставится и решается задача определения критериальных условий, которые обеспечивают поле температур МБА, функционирующей в космическом аппарате, идентичное полю температур этой же МБА, но функционирующей в климатической камере, при одинаковых тепловыделениях аппаратуры. Это позволяет заменить дорогие испытания тепловых режимов для МБА в тепловакуумных камерах на значительно более дешевые испытания в климатической камере.

Mathematical modeling of heat processes of miniature onboard equipment (MOE) for operation in nonpressurized modules is discussed. It is formulated and solved the problem of criteria conditions determination providing the temperature field of MOE operating in a spacecraft identical to the temperature field of the same MOE operating in climatic chamber under equal heat generation of the instruments. It allows us to change the expensive thermal tests for MOE in heat vacuum-chamber by much more cheaper thermal tests in climatic chamber.

Ключевые слова: спутниковая навигация, ГЛОНАСС, корреляционные свойства, последовательности Касами, последовательности Вейла.

Key words: моделирование, малогабаритная бортовая аппаратура, тепловые процессы, негерметичный отсек, климатическая камера.

Сокращения

- КА – космический аппарат;
- КК – климатическая камера;
- МБА – малогабаритная бортовая аппаратура;
- НГО – негерметичный отсек;
- ТВК – тепловакуумная камера;
- ТП – термоплата;
- РЭА – радиоэлектронная аппаратура.

Введение

Наблюдаемая в технике тенденция к миниатюризации коснулась и КА народнохозяйственного назначения, в частности спутников связи и дистанционного зондирования Земли, с применением негерметичных отсеков (НГО) и монтажных платформ, на которых монтируются блоки функциональной малогабаритной бортовой аппаратуры (МБА). Одновременно актуальной является необходимость снижения стоимости проектирования, испытаний, производства, эксплуатации изделий и их утилизация после выведения из эксплуатации.

Основными требованиями при проектировании малогабаритного спутника являются его высокая надежность и низкая стоимость. Поскольку внутренним содержанием МБА является радиоэлектронная аппаратура (РЭА), то одним из важнейших условий высокой надежности становится правильное поддержание ее теплового режима.

Важным этапом разработки МБА является этап экспериментальных и сдаточных испытаний. На этапе сдаточных испытаний, при серии достаточно большого объема, имитация тепловых процессов для МБА в полном, характерном для космического пространства объеме в тепловакуумной камере (ТВК), представляется очень дорогим мероприятием. В связи с этим обстоятельством поставлена задача разработки новой методологии испытаний с целью создания возможности моделирования условий эксплуатации МБА, размеща-

емой в НГО или открытом космосе, в значительно более дешевой климатической камере (КК).

В данной статье ставится и решается задача математического моделирования тепловых процессов МБА в НГО и КК с целью разработки методологии, позволяющей проводить испытания МБА в КК с условиями теплообмена, идентичными условиям НГО.

Математическое моделирование теплового режима МБА в НГО КА

В качестве объекта исследования рассматривается типовой блок МБА кассетного типа, общий вид которого изображен на рис. 1. Элементы РЭА установлены на вертикальных металлических стойках, по которым осуществляется передача выделяемой теплоты теплопроводностью к термоплате, на которой смонтирован блок МБА. Отвод теплоты от термоплаты осуществляется с помощью жидкостного теплоносителя, охлаждаемого средствами бортовой системы терморегулирования.

Расчетная схема НГО КА с установленным в нем блоком МБА показана на рис. 2, где T_1 – вектор поля температур, характеризующий тепловой режим блока; $T_{\text{ТП}}$ – средняя температура термоплаты; $T_{\text{СТ}}$ – средняя температура стенки НГО КК;

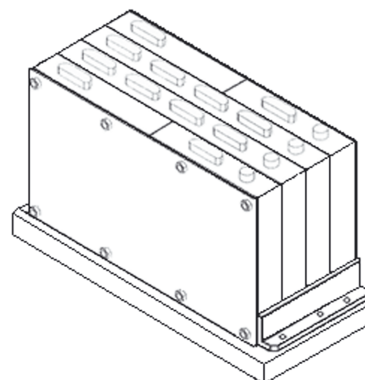


Рис. 1. Общий вид блока МБА

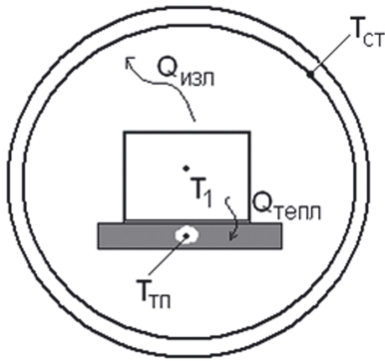


Рис. 2. Расчетная схема НГО КА с блоком МБА

$Q_{\text{тепл}}$ – тепловой поток теплопроводностью от блока МБА к термоплате; $Q_{\text{изл}}$ – лучистый тепловой поток между блоком МБА и стенками НГО КА.

Моделирование функционирования блока МБА проводится на основе дифференциальных уравнений с сосредоточенными параметрами. Достоверность такого подхода подтверждена многолетней практикой проектирования, анализа и испытаний различных блоков РЭА КА [1, 2, 3, 4].

Допущения, принимаемые при составлении математической модели:

1. Блок МБА разбивается на n изотермических элементов, характеризующихся средними температурами T_{li} и средними теплоемкостями $c_i, i=1, \dots, n$.
2. Выделенные элементы обмениваются между собой теплотой теплопроводностью и излучением.
3. Выделенные элементы обмениваются с окружающей средой НГО теплотой излучением. Средняя температура окружающей среды считается заданной.
4. Требуемый температурный уровень термоплаты обеспечивается средствами СТР КА, и средняя температура термоплаты считается заданной.
5. Элементы блока РЭА, ближайшие к термоплате, обмениваются с термоплатой теплотой теплопроводностью.

Тогда уравнения теплового баланса, описывающие функционирование блока МБА в НГО КА, имеют следующий вид:

$$c_i \frac{dT_{li}}{dt} = P_i + \sigma_i^{\text{конд}} (T_{\text{тп}} - T_{li}) + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^{\text{конд}} (T_{lj} - T_{li}) + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^{\text{изл}} (T_{lj}^4 - T_{li}^4) + \sigma_i^{\text{изл}} (T_{\text{среды}}^4 - T_{li}^4), i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где t – время; P_i – тепловая нагрузка на i -й элемент; $\sigma_i^{\text{конд}}$ – кондуктивная тепловая проводимость между i -м элементом и термоплатой; $\sigma_{ij}^{\text{конд}}$

– суммарная кондуктивная тепловая проводимость между i -м и j -м элементами; $\sigma_{ij}^{\text{изл}}$ – лучистая тепловая проводимость между i -м и j -м элементами; $\sigma_i^{\text{изл}}$ – лучистая тепловая проводимость между i -м элементом и окружающей средой; $T_{\text{среды}}$ – средняя температура окружающей среды.

Математическое моделирование теплового режима МБА в КК

Расчетная схема КК с установленным в нем блоком МБА показана на рис. 3, где $T_{\text{кк}}$ – средняя температура внутренней стенки КК, которая теплоизолирована с наружной стороны; $T_{\text{ввх}}$ – температура воздуха на входе в КК, подаваемого из холодильной машины, расположенной вне камеры; $T_{\text{ввых}}$ – температура воздуха на выходе из КК; $T_{\text{в}}$ – средняя температура воздуха в КК.

Допущения, принимаемые при составлении математической модели:

1. Блок МБА разбивается на те же n изотермических элементов, характеризующихся средними температурами T_{2i} и средними теплоемкостями $c_i, i=1, \dots, n$.
2. Выделенные элементы обмениваются между собой теплотой теплопроводностью и излучением.
3. Требуемый температурный уровень термоплаты обеспечивается средствами специального жидкостного терморегулирующего контура, находящегося вне КК, и средняя температура термоплаты считается заданной.
4. Элементы блока МБА, ближайшие к термоплате, обмениваются с термоплатой теплотой теплопроводностью.
5. Выделенные элементы обмениваются со стенками КК теплотой излучением.
6. Выделенные элементы и стенки КК обмениваются с воздухом КК теплотой конвекцией.

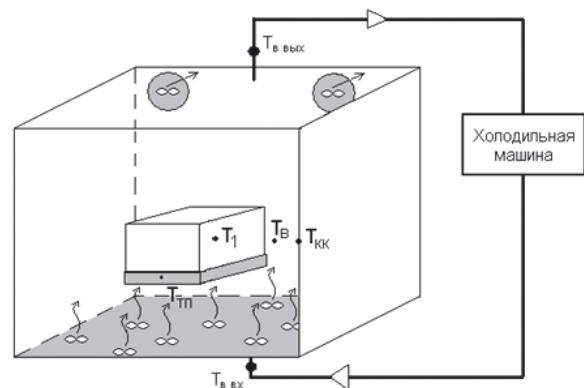


Рис. 3. Расчетная схема КК с блоком МБА

7. Температура воздуха на входе в КК считается заданной.

Тогда уравнения теплового баланса, описывающие функционирование блока МБА в КК, имеют следующий вид:

$$c_i \frac{dT_{2i}}{dt} = P_i + \sigma_i^{\text{конд}} (T_{\text{тп}} - T_{2i}) + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^{\text{конд}} (T_{2j} - T_{2i}) + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^{\text{изл}} (T_{2j}^4 - T_{2i}^4) + \sigma_i^{\text{ККизл}} (T_{\text{КК}}^4 - T_{2i}^4) + \sum_{j=1}^n (\alpha F)_i (T_{\text{в}} - T_{2i}), i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

где $\sigma_i^{\text{ККизл}}$ – лучистая тепловая проводимость между i -м элементом и стенкой КК; $(\alpha F)_i$ – средний коэффициент конвективного теплообмена между i -м элементом и воздухом;

Уравнение теплового баланса для стенки КК представляется в виде

$$(cm)_{\text{КК}} \frac{dT_{\text{КК}}}{dt} = \sum_{j=1}^n \sigma_j^{\text{ККизл}} (T_{2j}^4 - T_{\text{КК}}^4) + (\alpha F)_{\text{КК}} (T_{\text{в}} - T_{\text{КК}}), i = 1, \dots, n, \quad (3)$$

где $(cm)_{\text{КК}}$ – теплоемкость стенки КК; $(\alpha F)_{\text{КК}}$ – средний коэффициент конвективного теплообмена между стенкой камеры и воздухом.

Систему уравнений (2) и (3) следует дополнить уравнениями теплового баланса, описывающими процесс конвективного теплообмена в КК.

Допущения, принимаемые при составлении уравнений теплового баланса конвективного теплообмена:

1. Поток воздуха обладает небольшой тепловой инерционностью, и поэтому уравнения теплового баланса записываются в алгебраической форме.

2. Температуру воздуха, участвующего в конвективном теплообмене со всеми элементами блока МБА и стенками КК, считаем равной средней температуре воздуха $T_{\text{в}}$.

3. При расчете коэффициентов конвективного теплообмена потока воздуха с элементами МБА и стенками КК следует предусмотреть возможность моделирования режимов с вынужденной и естественной конвекцией при выключенном вентиляторе.

Тогда уравнения теплового баланса конвективного теплообмена имеют следующий вид:

$$T_{\text{в}} = 0,5(T_{\text{ввх}} + T_{\text{ввых}}); \\ (c_p G)(T_{\text{ввых}} - T_{\text{ввх}}) = \sum_{i=1}^n (\alpha F)_i (T_{2i} - T_{\text{в}}) + (\alpha F)_{\text{КК}} (T_{\text{КК}} - T_{\text{в}}), \quad (4)$$

где $(c_p G)$ – произведение теплоемкости на массовый расход воздуха.

Из уравнений (4) находится выражение для $T_{\text{ввых}}$

$$T_{\text{ввых}} = \left\{ \sum_{i=1}^n (\alpha F)_i T_{2i} + (\alpha F)_{\text{КК}} T_{\text{КК}} - \left[\sum_{i=1}^n \frac{(\alpha F)_i}{2} + \frac{(\alpha F)_{\text{КК}}}{2} - (c_p G) \right] T_{\text{ввх}} \right\} \frac{1}{\left[\sum_{i=1}^n \frac{(\alpha F)_i}{2} + \frac{(\alpha F)_{\text{КК}}}{2} + (c_p G) \right]} \quad (5)$$

и подставляется в уравнения (2) и (3), что дает окончательный вид математической модели тепловых процессов МБА в КК.

Постановка задачи выбора параметров КК

1. Задана математическая модель (1) блока МБА, установленного на термоплате и функционирующего в НГО КА. Все коэффициенты и параметры модели (1) известны.

2. Задана математическая модель (2), (3), (4) этого же блока МБА, установленного на термоплате и функционирующего в КК. В модели известны все коэффициенты, кроме варьируемого параметра – температуры воздуха $T_{\text{ввх}}$ на входе в камеру. При необходимости могут также варьироваться габариты КК, влияющие на лучистую тепловую проводимость между элементами МБА и стенками КК ($\sigma_i^{\text{ККизл}}$); расход воздуха в КК ($G_{\text{в}}$); средние коэффициенты конвективного теплообмена $(\alpha F)_i$ и $(\alpha F)_{\text{КК}}$, зависящие от габаритов КК и режима конвекции – вынужденного или естественного.

3. Для задаваемых тепловыделений элементов блока МБА $P_i, i = 1, \dots, n$ и температуры термоплат $T_{\text{тп}}$ требуется выбрать параметры климатической камеры: $T_{\text{ввх}}, (\sigma_i^{\text{ККизл}}), i = 1, \dots, n; G_{\text{в}}$; режим конвекции}, которые обеспечивают поле температур (T_{21}, \dots, T_{2n}) согласно системе (2) для блока МБА, функционирующего в КК, идентичное полю температур (T_{11}, \dots, T_{1n}) согласно системе (1) для этого же блока МБА, функционирующего в НГО КА.

Критериальные условия для выбора параметров КК

Для задаваемых тепловыделений элементов $P_i, i = 1, \dots, n$ и температуры термоплат $T_{\text{тп}}$ находим соответствующее им стационарное поле температур согласно системе (1) блока МБА, функционирующего в НГО. Обозначим его через $(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)})$.

Вводим обозначения для функций в правой части системы (1):

$$f_{li}(T_{11}, \dots, T_{ln}) = P_i + \sigma_i^{\text{конд}}(T_{\text{тп}} - T_{li}) + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^{\text{конд}}(T_{1j} - T_{li}) + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^{\text{изл}}(T_{1j}^4 - T_{li}^4) + \sigma_i^{\text{изл}}(T_{\text{среды}}^4 - T_{li}^4), i = 1, \dots, n. \quad (5)$$

Далее линеаризуем правые части системы (1) в окрестности полученного стационарного решения. Тогда система (1) в линеаризованной форме имеет следующий вид:

$$c_i \frac{dT_{li}}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_{li}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{ln}^{(0)})}{\partial T_{1j}} (T_{1j} - T_{1j}^{(0)}), i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Поскольку в системе (1) нелинейными членами являются только составляющие лучистых тепловых потоков, то погрешность линеаризации не превышает 5% в окрестности $T_{1j}^{(0)} \pm 20$ К [4].

Далее перепишем систему (6) в эквивалентном матричном виде:

$$\frac{dT_1}{dt} = AT_1 + B, \quad (7)$$

где $T_1 = \begin{pmatrix} T_{11} \\ \dots \\ T_{1n} \end{pmatrix}; A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} b_1 \\ \dots \\ b_n \end{pmatrix}.$

Коэффициенты матрицы А и вектора В вычисляются следующим образом:

$$a_{ij} = \frac{1}{c_i} \frac{\partial f_{li}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{ln}^{(0)})}{\partial T_{1j}}; i, j = 1, \dots, n;$$

$$b_i = -\frac{T_{li}^{(0)}}{c_i} \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_{li}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{ln}^{(0)})}{\partial T_{1j}}.$$

Заметим, что все элементы матрицы А и вектора В являются известными величинами.

Далее вводим обозначения для функций в правой части системы (2) и уравнения (3) с учетом того, что T_B выражается из уравнений (4), (5):

$$f_{2i}(T_{21}, \dots, T_{2n}, T_{\text{КК}}) = P_i + \sigma_i^{\text{конд}}(T_{\text{тп}} - T_{2i}) + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^{\text{конд}}(T_{2j} - T_{2i}) + \sum_{j=1}^n \sigma_{ij}^{\text{изл}}(T_{2j}^4 - T_{2i}^4) + \sigma_i^{\text{ККИЗЛ}}(T_{\text{КК}}^4 - T_{2i}^4) + \sum_{j=1}^n (\alpha F)_i(T_B - T_{2i}), i = 1, \dots, n.$$

$$f_{\text{КК}}(T_{21}, \dots, T_{2n}, T_{\text{КК}}) = \sum_{j=1}^n \sigma_i^{\text{ККИЗЛ}}(T_{2i}^4 - T_{\text{КК}}^4) + (\alpha F)_{\text{КК}}(T_B - T_{\text{КК}}).$$

Аналогичным образом линеаризуем правую часть системы (2) и уравнения (3) в окрестности того же стационарного поля температур $(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{\text{КК}}^{(0)})$. В качестве $T_{\text{КК}}^{(0)}$ с достаточной степенью точности можно принять среднюю температуру блока МБА:

$$T_{\text{КК}}^{(0)} = \left(\sum_{i=1}^n T_{li}^{(0)} \right) / n.$$

Тогда система (2) и уравнение (3) в линеаризованном виде имеют следующий вид:

$$c_i \frac{dT_{2i}}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_{2i}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{\text{КК}}^{(0)})}{\partial T_{2j}} (T_{2j} - T_{1j}^{(0)}) + \frac{\partial f_{2i}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{\text{КК}}^{(0)})}{\partial T_{\text{КК}}} (T_{\text{КК}} - T_{\text{КК}}^{(0)}), i = 1, \dots, n.$$

$$(cm)_{\text{КК}} \frac{dT_{\text{КК}}}{dt} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_{\text{КК}}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{\text{КК}}^{(0)})}{\partial T_{2j}} (T_{2j} - T_{1j}^{(0)}) + \frac{\partial f_{\text{КК}}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{\text{КК}}^{(0)})}{\partial T_{\text{КК}}} (T_{\text{КК}} - T_{\text{КК}}^{(0)}). \quad (8)$$

Приравняем правую часть последнего уравнения из системы (8) к нулю, что соответствует стационарному решению, и получаем отсюда выражение для $T_{\text{КК}}$:

$$T_{\text{КК}} = T_{\text{КК}}^{(0)} - \frac{\left[\sum_{j=1}^n \frac{\partial f_{\text{КК}}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{\text{КК}}^{(0)})}{\partial T_{2j}} (T_{2j} - T_{1j}^{(0)}) \right]}{\frac{\partial f_{\text{КК}}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{\text{КК}}^{(0)})}{\partial T_{\text{КК}}}}. \quad (9)$$

Тогда первые n уравнений системы (8) с учетом выражения для $T_{\text{КК}}$ из (9) можно переписать в эквивалентном матричном виде:

$$\frac{dT_2}{dt} = CT_2 + D, \quad (10)$$

где $T_2 = \begin{pmatrix} T_{21} \\ \dots \\ T_{2n} \end{pmatrix}; C = \begin{pmatrix} c_{11} & \dots & c_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ c_{n1} & \dots & c_{nn} \end{pmatrix}; D = \begin{pmatrix} d_1 \\ \dots \\ d_n \end{pmatrix}.$

Коэффициенты матрицы С и вектора В вычисляются следующим образом:

$$c_{ij} = \frac{1}{c_i} \frac{\partial f_{2i}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{\text{КК}}^{(0)})}{\partial T_{2j}} - \frac{\frac{\partial f_{\text{КК}}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{\text{КК}}^{(0)})}{\partial T_{\text{КК}}}}{\partial T_{\text{КК}}}$$

$$\frac{1}{c_i} \frac{\partial f_{2i}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{KK}^{(0)})}{\partial T_{KK}} \frac{\partial f_{KK}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{KK}^{(0)})}{\partial T_{2j}};$$

$i, j = 1, \dots, n;$

$$d_i = \frac{1}{c_i} \sum_{j=1}^n \frac{\partial f_{2i}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{KK}^{(0)})}{\partial T_{2j}} T_{1j}^{(0)} + \frac{\partial f_{KK}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{KK}^{(0)})}{\partial T_{KK}} + \frac{1}{c_i} \frac{\partial f_{2i}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{KK}^{(0)})}{\partial T_{KK}} \left[\sum_{j=1}^n \frac{\partial f_{KK}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{KK}^{(0)})}{\partial T_{2j}} T_{1j}^{(0)} \right] \frac{\partial f_{KK}(T_{11}^{(0)}, \dots, T_{1n}^{(0)}, T_{KK}^{(0)})}{\partial T_{KK}}.$$

Заметим, что часть элементов матрицы С и вектора D зависят от варьируемых параметров климатической камеры, а остальные – известные.

Далее с учетом уравнений (7) и (10) записываем уравнения, характеризующие стационарное поле температур блока МБА в окрестности рассматриваемого стационарного решения в НГО:

$$AT_1 + B = 0 \quad (11)$$

и в КК:

$$CT_2 + D = 0. \quad (12)$$

Для удовлетворения требованиям совпадения поля температур T_1 и T_2 блока МБА, функционирующего в НГО КА и в КК, из уравнений (11) и (12) получаем следующую зависимость:

$$A^{-1} \cdot B = C^{-1} \cdot D, \quad (13)$$

где матрицы A^{-1} и C^{-1} – обратные к матрицам А и С.

Таким образом получено критериальное условие (13), позволяющее выбирать варьируемые параметры КК. Выполнение условия (13) гарантирует выбор таких параметров КК, которые обеспечивают поле температур $T_2 = (T_{21}, \dots, T_{2n})$ блока МБА, функционирующего в КК, идентичное полю температур $T_1 = (T_{11}, \dots, T_{1n})$ этого же блока МБА, функционирующего в НГО КА, при одинаковых тепловыделениях элементов $P_i, i=1, \dots, n$ и температуре термоплаты $T_{ТП}$.

Условие (13) позволяет определить температуру воздуха $T_{ВВХ}$ на входе в КК и расход воздуха G_B , обеспечивающие условия теплообмена для блока МБА, полностью идентичные условиям НГО только, если $n=1$ (или 2).

Для большего количества изотермических элементов $n > 1$ условие (13) может быть использовано для построения алгоритма нахождения $T_{ВВХ}$ и G_B , обеспечивающих тепловые условия в КК, наиболее близкие к условиям НГО для блока МБА.

Алгоритм нахождения $T_{ВВХ}$ и G_B при $n > 1$.

1. Вычисляем поле температур блока МБА в НГО из решения уравнения (11) в скалярном виде: (T_{11}, \dots, T_{1n}) . Значения всех температур T_{1i} известны.

2. Выражаем поле температур в КК из решения (12) в скалярном виде. Температура T_{2i} в каждом i -м элементе зависит от неизвестных $T_{ВВХ}$ и G_B при прочих известных параметрах:

$$T_{21} = T_{21}(T_{ВВХ} \text{ и } G_B), \dots, T_{2n} = T_{2n}(T_{ВВХ} \text{ и } G_B), T_{KK} = T_{KK}(T_{ВВХ} \text{ и } G_B).$$

3. Вводим условие выбора $T_{ВВХ}$ и G_B , требуя, чтобы максимальное отклонение температуры элементов T_{2i} в КК от T_{1i} в НГО было минимальным:

$$\max_{i=1, \dots, n} |T_{2i}(T_{ВВХ}, G_B) - T_{1i}| \rightarrow \min_{T_{ВВХ}, G_B} \quad (14)$$

Таким образом, условие (14) является критерием выбора $T_{ВВХ}$ и G_B в КК при $n > 1$. При этом выражения $(T_{2i}(T_{ВВХ}, G_B) - T_{1i})$ будут характеризовать погрешность, с которой обеспечиваются тепловые условия для каждого i -го элемента в КК относительно требуемого теплового режима в НГО.

Выбор параметров КК для испытаний МБА при количестве изотермических элементов $n = 1$

В качестве примера рассмотрим типовой блок МБА с габаритами 280x120x88 мм, массой 15 кг, тепловая мощность которого изменяется в диапазоне $P=0..120$ Вт. Средняя температура термоплаты изменяется в диапазоне $T_{ТП}=263..313$ К. Блок МБА предназначен для функционирования в НГО КА цилиндрической формы с габаритами $d=600$ мм, $h=600$ мм. Средняя температура среды в НГО КА изменяется в диапазоне $T_{среды}=223..323$ К.

В качестве климатической камеры рассматривается КК с габаритами 1030x990x965 мм и диапазоном регулируемой температуры воздуха на входе в камеру $T_{ВВХ}=303..393$ К. Объемный расход воздуха равен $1,8 \text{ м}^3/\text{с}$.

Требуется определить параметры КК (температуру воздуха на входе $T_{ВВХ}$), обеспечивающие тепловые режимы блока МБА, идентичные следующим тепловым режимам блока МБА в НГО КА:

1) Режим максимальных тепловых нагрузок (режим перегрева):

средняя температура среды в НГО $T_{среды}=323$ К;
средняя температура термоплаты $T_{ТП}=313$ К;
тепловыделение блока МБА $P=120$ Вт.

2) Режим минимальных тепловых нагрузок (режим переохладения):

средняя температура среды в НГО $T_{cp} = 223$ К;
 средняя температура термоплаты $T_{тп} = 263$ К;
 тепловыделение блока МБА $P = 0$ Вт.

С помощью расчетов, проведенных по предложенному алгоритму и критериальному уравнению (13), получены результаты, представленные в таблице.

Параметры	Режим перегрева	Режим переохладения
$T_{тп}$, К	313	263
$T_{ст}$, К	323	223
P , Вт	120	0
T_1 , К	333,9	260,7
$T_{ввх}$, К	330,2	254,7
$T_{ввых}$, К	332,6	252,5
$T_в$, К	331,3	253,7
$T_{кк}$, К	329,4	251

Выводы

1. Проведено математическое моделирование тепловых процессов МБА в НГО КА и КК, и выведены критериальные условия (13) и (14), которые обеспечивают поле температур $T_2=(T_{21}, \dots, T_{2n})$ блока МБА, функционирующего в КК, идентичное полю температур $T_1=(T_{11}, \dots, T_{1n})$ этого же блока МБА, функционирующего в НГО КА, при одинаковых тепловыделениях элементов $P_i, i=1, \dots, n$ и температуре термоплаты $T_{тп}$.

2. Проведены расчеты значений температуры воздуха $T_{ввх}$ на входе в климатическую камеру, идентичную по воздействиям условиям эксплуатации типового блока МБА в НГО КА на режимах максимальной и минимальной тепловых нагрузок в соответствии с условием (13). Результаты расче-

тов подтверждают возможность обеспечить тепловые процессы МБА в КК, идентичные тепловым процессам МБА в НГО КА.

3. Точность расчетов определяется точностью моделирования теплового режима МБА системой обыкновенных дифференциальных уравнений теплового баланса, что подтверждается практикой многолетних исследований. Погрешность расчетов составляет 10–20%. В дальнейшем полученные тепловые параметры КК и МБА должны быть уточнены в результате испытаний МБА в ТВК и КК.

4. Исследования и расчеты проводились для одного ($n=1$) изотермического элемента, характеризующего тепловой режим типового блока МБА. Для большего количества изотермических элементов $n>1$, характеризующих тепловой режим МБА, требуется проведение расчетов по алгоритму нахождения $T_{ввх}$ и $G_в$, обеспечивающих тепловые условия в КК, наиболее близкие к условиям НГО для блока МБА в соответствии с условием (14).

Библиографический список

1. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. – М.: Радио и связь, 1990.
2. 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.
3. Кудрявцева Н.С., Малоземов В.В. Совместная оптимизация массоэнергетических характеристик системы терморегулирования космических аппаратов и приборного комплекса при обеспечении требуемой надежности // Вестник МАИ. 2009. Т.16, № 1. С. 5–14.
4. Малоземов В.В., Кудрявцева Н.С. Оптимизация систем терморегулирования космических аппаратов. – М.: Машиностроение, 1988.

Московский авиационный институт
 (государственный технический университет)

Научно-исследовательский институт точных приборов