

УДК 629.7.084

## **Выбор параметров климатической камеры для испытаний малогабаритной бортовой аппаратуры**

В.А. Алексеев, Н.С. Кудрявцева, А.С. Титова

### **Аннотация**

В статье рассматривается теоретическое обоснование выбора параметров климатических камер для испытания тепловых режимов малогабаритной бортовой аппаратуры (МБА), предназначенной для работы в негерметичных отсеках космических аппаратов. Это позволяет на этапе сдаточных испытаний, при серии большого объема, заменить дорогие испытания тепловых режимов МБА в тепловакуумной камере на значительно более дешевые испытания в климатической камере.

### **Ключевые слова:**

тепловые испытания; малогабаритная бортовая аппаратура; негерметичный отсек; климатическая камера.

### **Введение**

Блоки малогабаритной бортовой аппаратуры (МБА) на спутниках связи, дистанционного зондирования Земли и других КА монтируются в негерметичных отсеках (НГО). Определяющим условием высокой надежности МБА является правильное поддержание ее теплового режима.

На этапе испытаний МБА в термокамере должны воспроизводиться условия, обеспечивающие адекватность эксплуатационным воздействиям на аппаратуру на борту космического аппарата (КА). Для условий штатной эксплуатации МБА в составе КА должно учитываться влияние вакуума и невесомости на тепловое состояние аппаратуры. Поэтому

условия штатной эксплуатации наиболее точно моделируются в тепловакуумной камере (ТВК).

Для удешевления этапа сдаточных испытаний МБА рассматривается задача перехода от испытаний тепловых режимов МБА в ТВК к испытаниям в климатической камере (КК).

В статье [1] приведено математическое моделирование тепловых процессов МБА в ТВК и КК с целью разработки методологии, позволяющей проводить испытания МБА в КК с условиями теплообмена, адекватными условиям НГО КА.

В данной статье рассматривается теоретическое обоснование выбора параметров климатических камер для испытания тепловых режимов МБА, предназначенной для работы в НГО КА.

### **1. Требования по обеспечению теплового режима. Постановка задачи исследования**

Рассматривается типовой блок МБА кассетного типа. Тепловая схема блока МБА, состоящего из одной технологической кассеты, представлена на рис. 1. Электро-радиоизделия (ЭРИ) – 1 установлены на многослойных печатных платах (МПП) – 2, которые прикреплены к алюминиевой рамке – 3. Алюминиевая рамка устанавливается на термостатируемую с помощью бортовой системы терморегулирования КА термоплату – 4 через теплопроводящую прокладку – 5. Со всех боковых сторон кассеты установлены крышки - 6.

Гермообъем КА – негерметичный и закрытый от попадания солнечного излучения и излучения Земли. Характеризуется невесомостью и глубоким вакуумом. В техническом задании даны требования по двум температурам окружающей среды для блока МБА:

- температуре термоплаты - 4 КА, которая может изменяться для режимов минимальной и максимальной тепловых нагрузок в диапазоне от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  соответственно;

- температуре конструкций НГО КА, которая может изменяться для режимов минимальной и максимальной тепловых нагрузок в диапазоне от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$  соответственно.

Требуется, чтобы температура ЭРИ – 1 блока МБА находилась в пределах норм, оговоренных в технических условиях.

Ставится задача определения тепловых режимов блока МБА в реальных условиях НГО КА с помощью испытаний в КК с имитацией таких условий проведения испытаний

блока МБА в КК, при которых обеспечивается адекватность эксплуатационным воздействиям на борту КА, заданным в техническом задании.

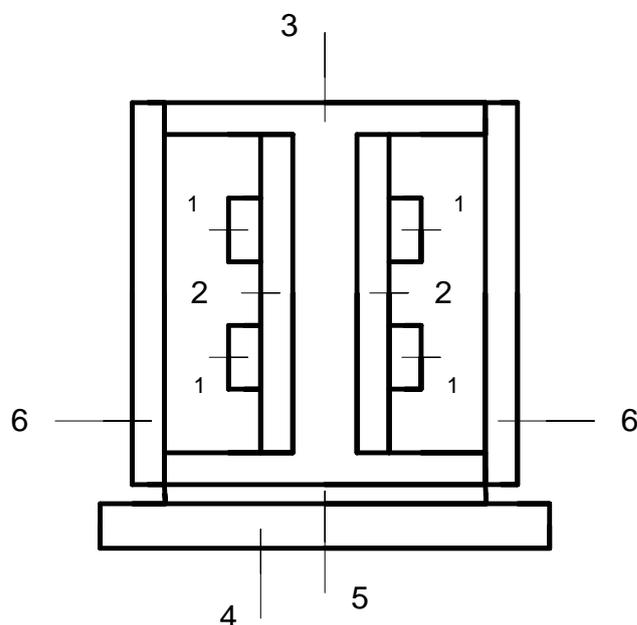


Рис. 1. Тепловая схема блока МБА:

1 – ЭРИ; 2 – МПП; 3 – алюминиевая рамка; 4 – термоплата;  
5 - теплопроводящая прокладка; 6 – крышка

Условия окружающей среды в НГО КА могут быть достаточно точно воспроизведены в ТВК в форме цилиндра со степенью черноты внутренней поверхности стенок равной 0,9. Поэтому оценка температур ЭРИ блока МБА в условиях космоса проводится для ТВК с температурами конструкций гермообъема и термоплаты, заданными в техническом задании.

Тепловая схема климатической камеры с установленным в ней блоком МБА показана на рис. 2. Блок МБА – 1 установлен на термоплату – 3, которая смонтирована на подставке – 2, стоящей на полу КК. Температура термоплаты может быть регулируемой в диапазоне от  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$  при наличии дополнительного оборудования, имитирующего функционирование системы терморегулирования КА. Температура воздуха на входе в КК может регулироваться в диапазоне от  $-50^{\circ}\text{C}$  до  $+70^{\circ}\text{C}$ . В верхней части задней стенки камеры расположены два вентилятора – 4, отводящие воздух из объема камеры. Подача воздуха в

объем осуществляется равномерно по всей площади сетчатого дна камеры с постоянной скоростью. Степень черноты внутренней стенки – 5 камеры равна 0,9.

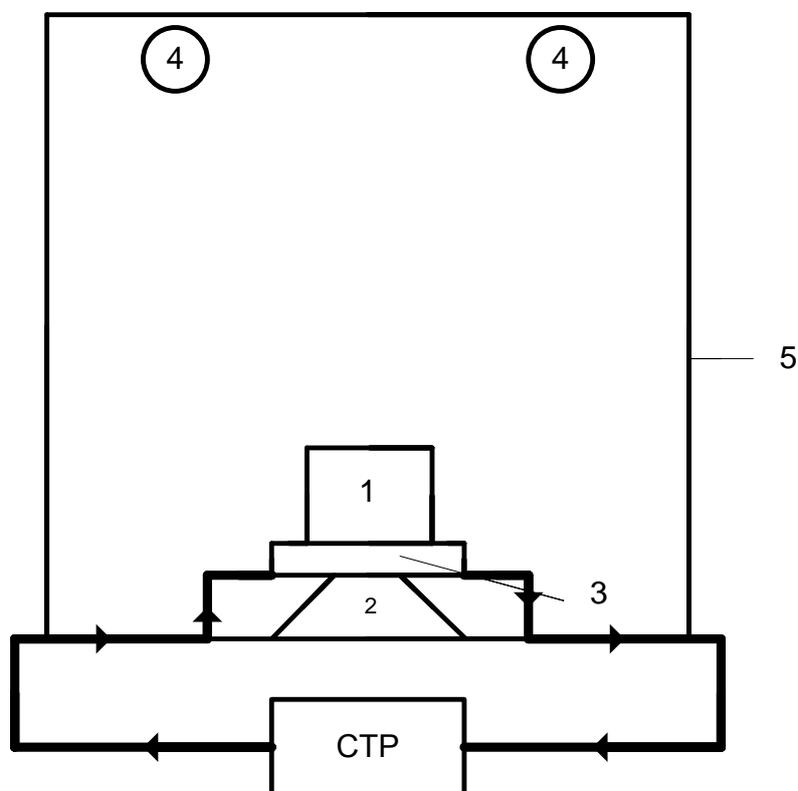


Рис. 2. Тепловая схема КК с установленным в ней блоком МБА:

1 – блок МБА; 2 – подставка; 3 – термоплата; 4 – вентилятор; 5 – стенка КК

Точное воспроизведение условий НГО КА в КК невозможно из-за наличия в КК силы тяжести, нормального давления воздуха, свободноконвективного течения воздуха внутри блока МБА и вынужденного конвективного движения воздуха, взаимодействующего с блоком МБА снаружи. Поэтому тепловым испытаниям блока МБА в КК должен предшествовать этап расчета параметров КК, при которых обеспечивается адекватность эксплуатационным воздействиям, заданным в техническом задании

## 2. Алгоритмы выбора параметров КК

В статье [1] приведено критериальное условие по выбору параметров КК в случае, когда блок МБА – изотермический и его тепловая математическая модель может быть описана с помощью одного изотермического элемента. В этом случае КК с выбранными

параметрами обеспечивает точное совпадение тепловых режимов блока МБА с соответствующими тепловыми режимами блока МБА в ТВК.

Рассмотрим алгоритм выбора параметров КК для испытаний блока МБА, тепловая математическая модель которого характеризуется  $n$  изотермическими элементами, где  $n > 1$ . Используются математические модели тепловых процессов блока МБА в ТВК и КК на основе дифференциальных уравнений с сосредоточенными параметрами, изложенные в [1, 2]. В качестве определяемых параметров КК возможно рассмотрение двух вариантов: температуры термоплаты в КК или температуры воздуха на входе в КК. В соответствие с техническим заданием отдельно рассматриваются режимы перегрева и переохлаждения.

### **2.1. Алгоритм выбора параметров КК при выборе температуры термоплаты в качестве определяемого параметра:**

1. Расчет ожидаемых температур ЭРИ в НГО КА на режиме перегрева при температуре термоплаты  $T_{ТП} = +40^{\circ}\text{C}$  и температуре стенок камеры  $T_{СТ} = +50^{\circ}\text{C}$  путем моделирования теплового режима блока МБА в ТВК.

2. Проведение серии расчетов температур ЭРИ в КК при температуре воздуха на входе  $T_{ввх} = +50^{\circ}\text{C}$ . Определяем требуемую температуру термоплаты  $T_{ТП}$  в КК по следующему критерию:

Требуется, чтобы максимальное отклонение температур соответствующих изотермических элементов – ЭРИ в ТВК и КК было минимальным

$$\max_{i=1, \dots, n} |T_{iКК}(T_{ТП}) - T_{iТВК}| \rightarrow \min_{T_{ТП}} \quad (1)$$

где  $T_{iКК}, T_{iТВК}, i = 1, \dots, n$ , - температуры соответствующих изотермических элементов - ЭРИ в КК и ТВК;  $n$  - количество изотермических элементов.

В результате получаем искомую температуру ТП в КК на режиме перегрева -  $T_{ТП}^{max}$ .

3. Расчет ожидаемых температур ЭРИ в НГО КА на режиме переохлаждения при  $T_{ТП} = -10^{\circ}\text{C}$  и  $T_{СТ} = -50^{\circ}\text{C}$  путем моделирования теплового режима блока МБА в ТВК.

4. Проведение серии расчетов температур ЭРИ в КК при температуре воздуха на входе  $T_{ввх} = -20^{\circ}\text{C}$ . Определяем требуемую температуру термоплаты  $T_{ТП}$  в КК по аналогичному

критерию (1) и в результате получаем искомую температуру ТП в КК на режиме переохлаждения -  $T_{ТП}^{min}$ .

## 2.2. Алгоритм выбора параметров КК при выборе температуры воздуха на входе в качестве определяемого параметра.

Схема построения системы обеспечения теплового режима бортовой аппаратуры выполнена таким образом, что основная доля рассеиваемой мощности передается на термоплату КА. При этом тепловой анализ показал [1], что влияние температуры конструкции КА на тепловой режим блока МБА менее значительно, так как теплообмен с конструкцией негерметичного отсека КА осуществляется только излучением, а основным стоком теплоты для блока МБА является термоплата КА. Поэтому представляет интерес алгоритм выбора параметров КК, когда температура термоплаты задается равной требуемому в техническом задании значению, а определяемой является температура воздуха на входе в камеру.

1. Расчет ожидаемых температур ЭРИ в НГО КА на режиме перегрева при температуре термоплаты  $T_{ТП}=+40^{\circ}\text{C}$  и температуре стенок камеры  $T_{СТ}=+50^{\circ}\text{C}$  путем моделирования теплового режима блока МБА в ТВК.

2. Проведение серии расчетов температур ЭРИ в КК при  $T_{ТП}=+40^{\circ}\text{C}$ . Определяем требуемую  $T_{вх}$  в КК по следующему критерию:

Требуется, чтобы максимальное отклонение температур соответствующих изотермических элементов – ЭРИ в ТВК и КК было минимальным

$$\max_{i=1,\dots,n} |T_{iКК}(T_{вх}) - T_{iТВК}| \rightarrow \min_{T_{вх}} \quad (2)$$

где  $T_{iКК}, T_{iТВК}, i = 1, \dots, n$ , - температуры соответствующих изотермических элементов - ЭРИ в КК и ТВК;  $n$  - количество изотермических элементов.

В результате получаем искомую температуру воздуха на входе в КК на режиме перегрева -  $T_{вх}^{max}$ .

3. Расчет ожидаемых температур ЭРИ в НГО КА на режиме переохлаждения при  $T_{ТП}=-10^{\circ}\text{C}$  и  $T_{СТ}=-50^{\circ}\text{C}$  путем моделирования теплового режима блока МБА в ТВК.

4. Проведение серии расчетов температур ЭРИ в КК при  $T_{ТП} = -10^{\circ}\text{C}$ . Определяем требуемую температуру воздуха на входе в КК по аналогичному критерию (2) и в результате получаем искомую температуру воздуха на входе в КК на режиме переохлаждения -  $T_{вх}^{min}$ .

### 3. Выбор параметров КК для испытаний блока МБА

Рассматривается выбор параметров КК для испытаний типового блока МБА (рис. 1), математические модели теплового режима функционирования которого в ТВК и КК характеризуются  $n=187$  изотермическими элементами, из которых 120 элементов описывают средние температуры ЭРИ на МПП. В режиме перегрева суммарное тепловыделение блока МБА составляет  $P=160$  Вт, а в режиме переохлаждения -  $P=5$  Вт при равномерном тепловыделении всех ЭРИ. Точность совпадения температур ЭРИ определяется по максимальному отклонению температур соответствующих изотермических элементов – ЭРИ в ТВК и КК:

$$\max_{i=1,\dots,n} |T_{iКК} - T_{iТВК}|.$$

#### 3.1. Определяемый параметр КК – температура термоплаты

Результаты расчета требуемых параметров КК на режимах перегрева и переохлаждения представлены в таблице 1 при определяемом параметре КК – температуре термоплаты  $T_{ТП}$ .

При выборе  $T_{ТП}$  в качестве определяемого параметра КК на режиме перегрева наименьшая точность совпадения температур наблюдается для ЭРИ, расположенных в нижней части МПП и достигает  $5,3^{\circ}\text{C}$ , а на режиме переохлаждения - для ЭРИ, расположенных в верхней части МПП и достигает  $2,9^{\circ}\text{C}$ .

При необходимости проведения испытаний блока МБА в КК при других значениях тепловой мощности прибора  $P$  требуемую  $T_{ТП}$  можно определить из графика на рис.3 для режимов перегрева при  $20 \text{ Вт} \leq P < 160 \text{ Вт}$  и из графика на рис. 4 для режимов переохлаждения при  $0 \text{ Вт} \leq P < 5 \text{ Вт}$ .

Таблица 1

Параметры	Режим перегрева	Режим переохлаждения
$P, \text{Вт}$	160	5
$T_{ТП}, ^\circ\text{C}$	$T_{ТП}^{max} = 51$	$T_{ТП}^{min} = -5$
$\max_{i=1, \dots, n}  T_{iKK} - T_{iTBK} $	5,3	2,9

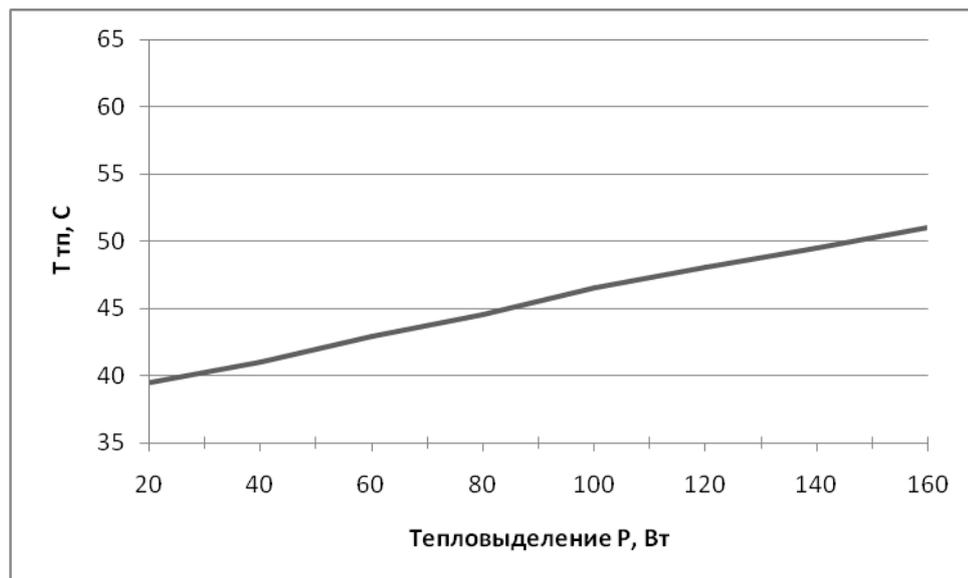


Рис. 3. Зависимость температуры термоплаты в КК от тепловой мощности блока МБА на режимах перегрева ( $T_{с.ав} = 50^\circ\text{C}$ )

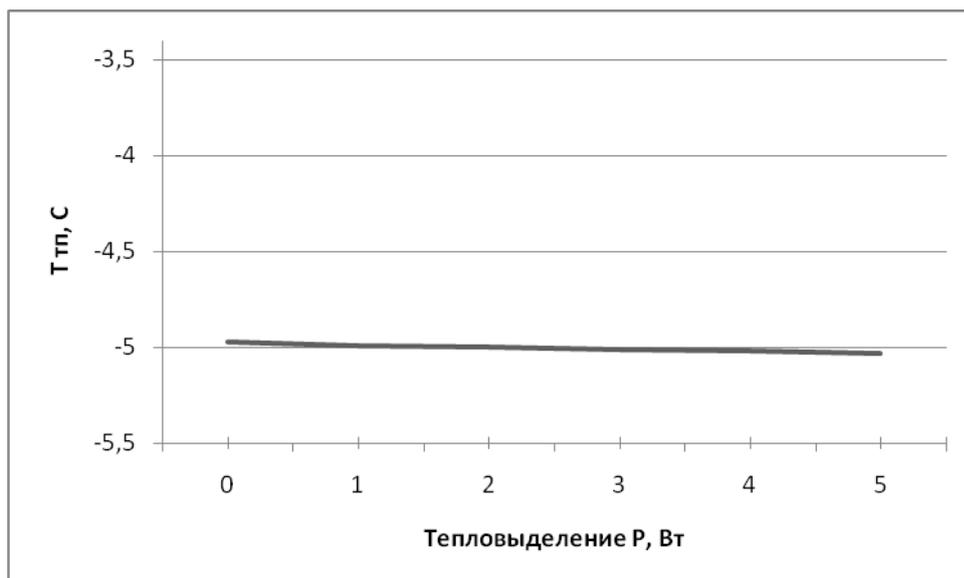


Рис. 4. Зависимость температуры термоплаты в КК от тепловой мощности блока МБА на режимах переохлаждения ( $T_{в.вх} = -50^{\circ}\text{C}$ )

### 3.2. Определяемый параметр КК – температура воздуха на входе в камеру

Результаты расчета требуемых параметров КК при определяемом параметре КК – температуре воздуха на входе  $T_{ввх}$ . на режимах перегрева и переохлаждения представлены в таблице 2.

При выборе  $T_{ввх}$  в качестве определяемого параметра КК (таблица 2) на режиме перегрева наименьшая точность совпадения температур наблюдается для ЭРИ, расположенных в верхней части МПП и достигает  $1,1^{\circ}\text{C}$ , а на режиме переохлаждения - для ЭРИ, расположенных в верхней и нижней частях МПП и достигает  $0,1^{\circ}\text{C}$ .

Таблица 2

Параметры	Режим перегрева	Режим переохлаждения
$P, \text{Вт}$	160	5
$T_{ввх}, ^{\circ}\text{C}$	$T_{ввх}^{max} = 63$	$T_{ввх}^{min} = -18$
$\max_{i=1, \dots, n}  T_{iКК} - T_{iТБК} $	1,1	0,1

При необходимости проведения испытаний блока МБА в КК при других значениях тепловой мощности прибора  $P$  требуемую  $T_{вх}$  можно определить из графика на рис. 5 для режимов перегрева при  $20 \text{ Вт} \leq P < 160 \text{ Вт}$  и из графика на рис. 6 для режимов переохлаждения при  $0 \text{ Вт} \leq P < 5 \text{ Вт}$ .

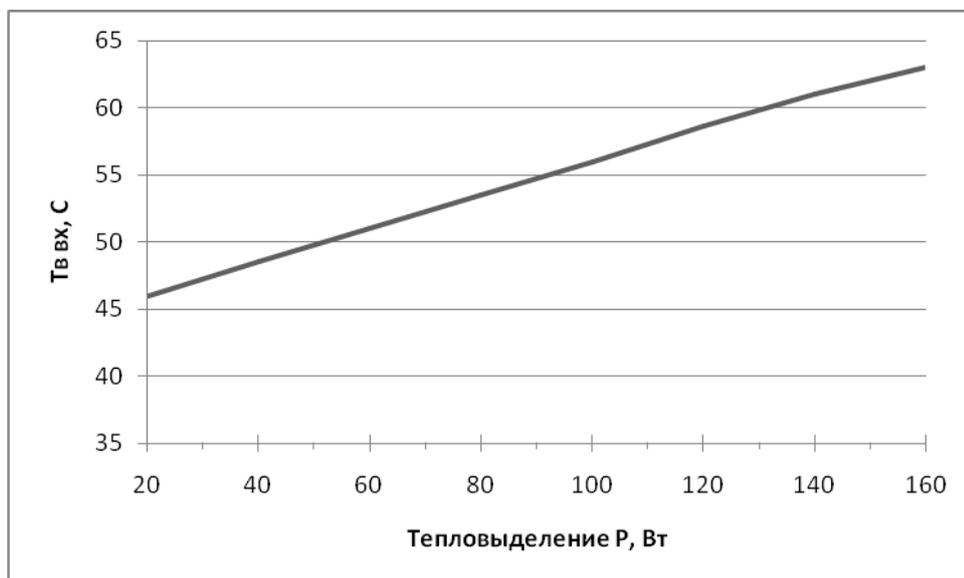


Рис. 5. Зависимость температуры воздуха на входе в КК от тепловой мощности блока МБА на режимах перегрева ( $T_{III}=+40^{\circ}\text{C}$ )

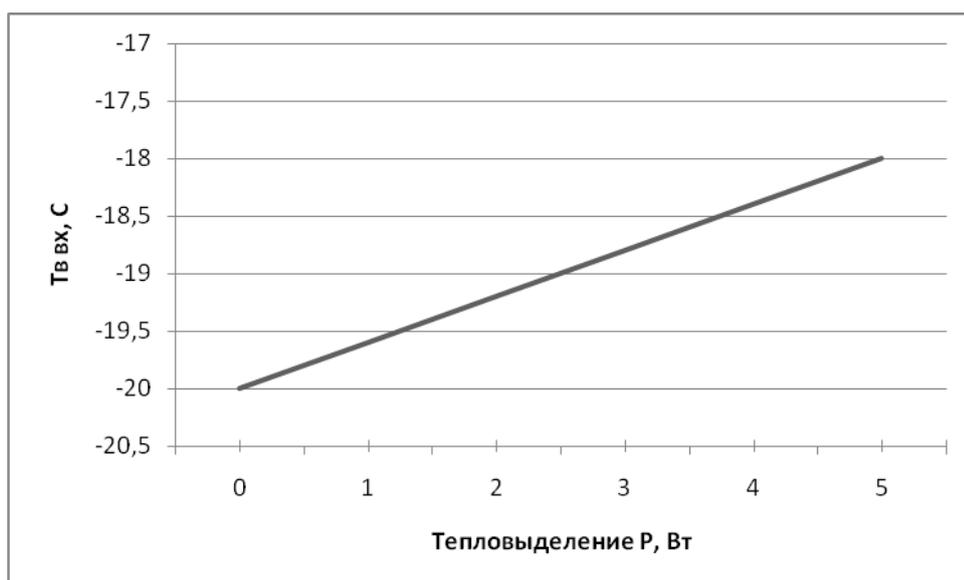


Рис. 6. Зависимость температуры воздуха на входе в КК от тепловой мощности блока МБА на режимах переохлаждения ( $T_{III}=-10^{\circ}\text{C}$ )

#### 4. Алгоритм выбора параметров КК для испытаний блоков МБА, закрытых теплоизоляцией

Рекомендуется для испытаний блоков МБА, которые после установки на термоплату КА закрываются теплоизоляцией. В этом случае исключается вынужденный конвективный теплообмен между стенками блока МБА и воздухом в КК. Тепловая схема блока МБА показана на рис. 7.

В усовершенствованной КК, тепловая схема которой представлена на рис. 8, блок МБА отделяется от стенок КК экранами, средняя температура которых  $T_{\text{э}}$  может поддерживаться с помощью инфракрасных нагревателей в диапазоне от  $-50^{\circ}\text{C}$  на режиме переохлаждения до  $+50^{\circ}\text{C}$  на режиме перегрева.

Математическое моделирование тепловых режимов функционирования блока МБА (рис. 7) в ТВК и в КК (рис. 8) показывает, что усовершенствованная конструкция КК обеспечивает условия, адекватные по воздействиям условиям штатной эксплуатации МБА в замкнутом НГО КА.

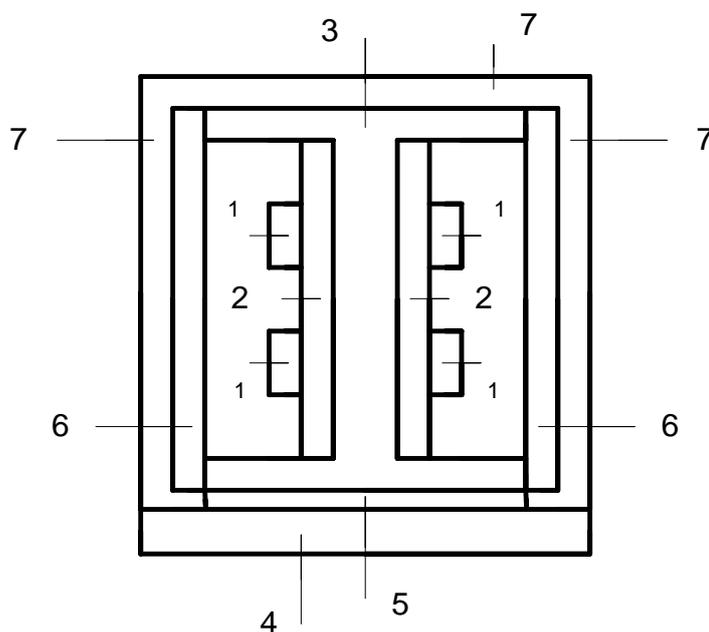


Рис. 7. Тепловая схема блока МБА,

наружная поверхность которого закрыта теплоизоляцией:

- 1 – ЭРИ; 2 – МПП; 3 – алюминиевая рамка; 4 – термоплата; 5 – теплопроводящая прокладка; 6 – крышка; 7 - теплоизоляция

Алгоритм выбора параметров КК усовершенствованной конструкции представляется в следующем виде:

1. Параметры КК на режимах перегрева и переохлаждения задаются в соответствии с данными, приведенными ниже в таблице 3.

2. Ожидаемая точность совпадения температур ЭРИ для типовых блоков МБА (рис. 7) в ТВК и КК определяется как  $\max_{i=1,\dots,n} |T_{iKK} - T_{iТВК}|$  и составляет  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  на режимах перегрева и переохлаждения

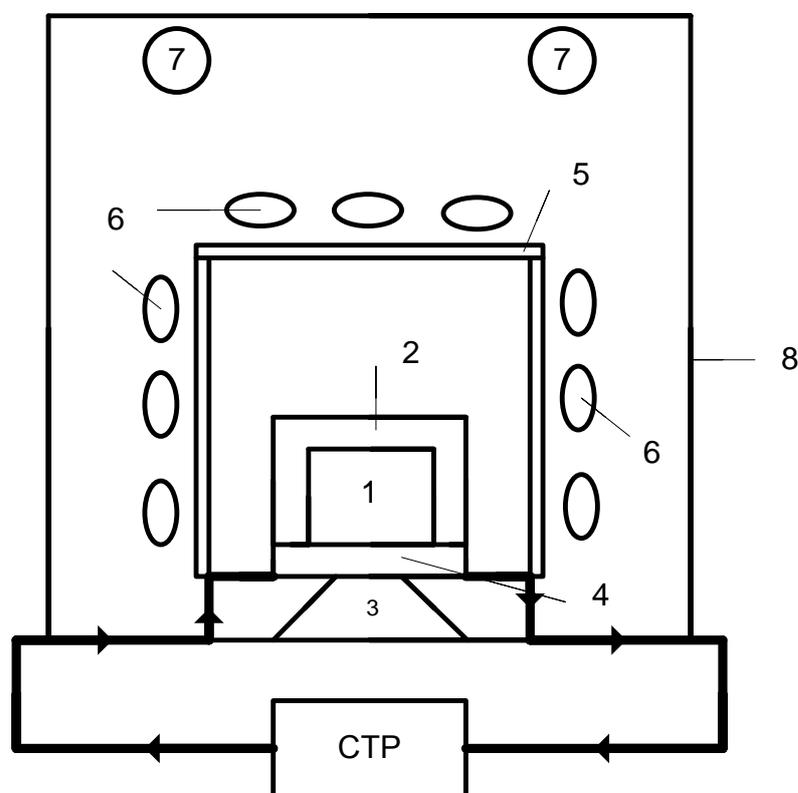


Рис. 8. Тепловая схема КК с блоком МБА, закрытым теплоизоляцией:

1 – блок МБА; 2 – теплоизоляция; 3 – подставка; 4 – термоплата; 5 – экран; 6 – инфракрасные нагреватели; 7 – вентилятор; 8 – стенка КК

Таблица 3

Параметры	Режим перегрева	Режим переохлаждения
$T_{ТП}, ^\circ\text{C}$	$T_{ТП}^{max} = +40$	$T_{ТП}^{min} = -10$
$T_{\text{э}}, ^\circ\text{C}$	+50	-50
$T_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	+50	-20

## 5. Выводы

1. Разработаны алгоритмы выбора параметров КК для испытаний блока МБА, предназначенного для функционирования в НГО КА, на основе математического моделирования тепловых режимов блока МБА в ТВК и КК в двух вариантах, когда в качестве определяемого параметра КК выбирается температура термоплаты или температура воздуха на входе в КК. В качестве критерия адекватности тепловых воздействий в КК тепловым воздействиям в ТВК выбран критерий минимизации максимального отклонения температур соответствующих ЭРИ в КК и ТВК.

2. Проведен выбор температуры термоплаты в КК, обеспечивающей тепловой режим типового блока МБА в КК, адекватный тепловому режиму блока МБА в ТВК, для режимов перегрева и переохлаждения. При равномерном тепловыделении всех ЭРИ на режиме перегрева наименьшая точности совпадения температур наблюдается для ЭРИ, расположенных в нижней части МПП, и достигает  $5,3^\circ\text{C}$  при суммарной тепловой мощности блока равной 160 Вт. На режиме переохлаждения наименьшая точность совпадения температур наблюдается для ЭРИ, расположенных в нижней части МПП, и составляет  $2,9^\circ\text{C}$  при суммарной тепловой мощности блока равной 5 Вт.

3. Проведен выбор температуры воздуха на входе в КК, обеспечивающей тепловой режим типового блока МБА в КК, адекватный тепловому режиму блока МБА в ТВК, для режимов перегрева и переохлаждения. При равномерном тепловыделении всех ЭРИ на режиме перегрева наименьшая точности совпадения температур наблюдается для ЭРИ, расположенных в верхней части МПП, и достигает  $1,1^\circ\text{C}$  при суммарной тепловой мощности блока равной 160 Вт. На режиме переохлаждения наименьшая точность совпадения температур наблюдается для ЭРИ, расположенных в верхней и нижней частях МПП, и составляет  $0,1^\circ\text{C}$  при суммарной тепловой мощности блока равной 5 Вт.

4. При выборе в качестве определяемой температуры воздуха на входе в КК имеет место совпадение граничных условий по температуре термоплаты, на которую идет основной сток теплоты от блока МБА в КК и ТВК, что является причиной более точного совпадения температур ЭРИ в КК и ТВК (расхождения в пределах  $1^{\circ}\text{C}$ ) на всех режимах перегрева и переохлаждения.

5. Усовершенствованная конструкция КК практически полностью (с точностью до  $0,3^{\circ}\text{C}$ ) обеспечивает тепловые условия, адекватные по воздействиям условиям тепловых испытаний в ТВК при наличии на наружной поверхности блока МБА теплоизоляции и отделения блока от стенок КК термостатируемыми экранами. Такая тепловая схема испытаний может быть уточнена после отработки методики испытаний.

6. Точность расчетов определяется точностью моделирования теплового режима блока МБА системой обыкновенных дифференциальных уравнений теплового баланса. Погрешность расчетов составляет 10-12 %, что подтверждается практикой многолетних исследований. В дальнейшем полученные результаты должны быть уточнены при проведении испытаний блоков МБА в КК и ТВК.

### **Библиографический список**

1. *Алексеев В.А., Кудрявцева Н.С., Малоземов В.В. др.* Математическое моделирование тепловых процессов малогабаритной бортовой аппаратуры // Вестник МАИ. 2010. Т.17, № 1. С. 55-61.

2. *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.

### **Сведения об авторах**

Алексеев Владимир Антонович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), заместитель главного конструктора Открытого акционерного общества «НИИ точных приборов», д.т.н.,

ул. Декабристов, владение 51, Москва, 127490;

тел.: (499) 202-95-27; e-mail: vladimir.alekseev@niitp.ru

Кудрявцева Наталья Сергеевна, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н.

МАИ, Волоколамское ш., 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993;

тел. (499) 158-48-89, e-mail: nkudr@mai.ru

Титова Алина Сергеевна, инженер I категории Открытого акционерного общества «НИИ точных приборов», аспирант Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

ул. Декабристов, владение 51, Москва, 127490;

тел.: (499) 202-95-27; e-mail: da127@yandex.ru