

Изотермическая подложка 1 — плоская тепловая труба, установленная в корпусе 2 блока, соединяется с СТР, состоящей из двух газорегулирующих тепловых труб (ГРТТ) 4. Контакт ГРТТ с подложкой осуществляется по фланцам 3. Зоны конденсации тепловых труб соединены с секционным радиатором-излучателем 5. В конце зоны конденсации расположены баллоны 6 для аккумуляции неконденсирующегося газа. Для разгрузки зоны изгиба ГРТТ конец радиатора укреплен на двух стеклопластиковых опорах 7. Корпус 2 блока устанавливается на посадочных местах объекта с помощью четырех стеклопластиковых опор 8. Поверхность блока и обращенная к нему поверхность радиатора покрываются экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ).

Изотермическая подложка (ИП) представляет собой плоскую тепловую трубу размером 180×130×3,8 мм. На одну из ее поверхностей наклеена плата 13 из диэлектрика ФДМЭ 1-0,13 с резисторами 10, имитирующими радиоэлементы (рис. 1, б, в).

Теплота рассеяния, выделяемая резисторами 10, воспринимается изотермической подложкой 1. Образующиеся при этом пары теплоносителя осуществляют теплоперенос от элементов к зонам конденсации ИП, где осуществляется конденсация теплоносителя и передача тепла к зонам нагрева ГРТТ 3. Расстояние теплопереноса (размеры ИП) принципиальных ограничений не имеет, что отличает эту схему от цельнометаллической платы. ГРТТ осуществляют отвод тепла к радиатору-излучателю 5 и регулирование уровня температуры подложки. Для повышения точности стабилизации температуры в СТР предусмотрен малогабаритный регулятор температуры 9, управляющий температурой баллонов ГРТТ. Регулятор установлен в корпусе блока [5, с. 67].

Рассмотрим схему термических сопротивлений предложенной конструкции (рис. 2). Тепловой поток от каждого i -го элемента ($i=1, 2, \dots, N$) Q_1, Q_2, \dots, Q_N через термические сопротивления перехо-

да “элемент—подложка” R_1, R_2, \dots, R_N воспринимается тепловой трубой — подложкой. (Температура подложки под каждым элементом обозначена $T_{п,1}, T_{п,2}, \dots, T_{п,N}$.) Далее тепловой поток за счет процессов парообразования (испарения или кипения) воспринимается паровой средой. (Термические сопротивления процесса обозначены $R_{н,1}, R_{н,2}, \dots, R_{н,N}$.) Температура парового пространства $T_{п}$ под каждым элементом постоянна, что обеспечивает одинаковую температуру каждого элемента. Сброс тепла производится на две зоны конденсации — А и В. (Сопротивления при конденсации паров обозначены $R_{к,А}$ и $R_{к,В}$.) Наименьшая температура подложки определяется температурами $T_{к,А}$ и $T_{к,В}$ в области контакта с зоной нагрева ГРТТ. (Теплоемкость каждого i -го элемента обозначена C_1, C_2, \dots, C_N , корпуса — $C_{кор}$, радиатора — $C_{р}$, баллона — $C_б$, суммарная теплоемкость зоны нагрева и транспортной зоны — $C_{н+тр}$, теплоемкость изотермической подложки — $C_{ип}$.)

Значения теплового потока $Q_{ГРТТ}$, подводимого к ГРТТ, зависят от влияния корпуса блока. Часть тепла $\sum_{i=1}^N Q_i$ отводится к корпусу (или наоборот) излучением от элементов (соответствующие сопротивления $R_{1-кор}, R_{2-кор}, \dots, R_{N-кор}$), от поверхности подложки с элементами (сопротивления $R_{п,1-кор}, R_{п,2-кор}, \dots, R_{п,N-кор}$), с поверхности подложки без элементов ($R'_{п-кор}$) и посредством контакта подложки с корпусом ($R''_{п-кор}$). На температуру корпуса $T_{кор}$ влияет температура посадочных мест прибора $T_{пм}$, а также окружающей среды T_0 , через сопротивления $R_{пм-кор}, R_{кор-о}$ соответственно.

Данные по сопротивлению определяют качество теплоизоляции и используемых тепловых развязок.

Уровень температуры пара в ИП определяется температурой пара в ГРТТ А и В, термическими сопротивлениями контакта между ИП и зоной нагрева ГРТТ ($R_{конт,А}, R_{конт,В}$), сопротивлением зоны нагрева ГРТТ ($R_{н,А}, R_{н,В}$). Отвод тепла от ГРТТ в окружающую среду (T_0) осуществляется через переменные сопротивления $R_{конт,А}, R_{конт,В}$ и $R_{р-о}$. Внешние воздействия на радиатор и баллон определяются соответственно потоками $Q_{вн(т)}$ и $Q_{б(т)}$. При работе регулятора на баллоны дополнительно подается мощность $Q_{б-рег}$ — в зависимости от температуры подложки около i -го элемента или от температуры пара $T_{п}$.

Исходя из схемы термических сопротивлений определены требования для обеспечения стабильности температуры элементов. Ввиду того, что величины $R_{i-кор}, R_{п,i-кор}$ весьма велики и температуры $T_{кор}$ и T_i отличаются ненамного, практически весь поток от каждого элемента Q_i передается через ИП к ГРТТ. Поэтому температура i -го элемента определяется как

$$T_i = T_{п} + Q_i(R_{н,i} + R_i).$$

Для обеспечения условия $T_i = \text{const}$ необходимо, чтобы $Q_i(R_{н,i} + R_i) \approx \text{const}$. Из последнего условия можно разработать требования к функциям $R_{н,i}(Q_i)$ и $R_i(Q_i)$ для конкретного типа элементов. При $R_1 = R_2 = R_i$ стабилизирующим фактором

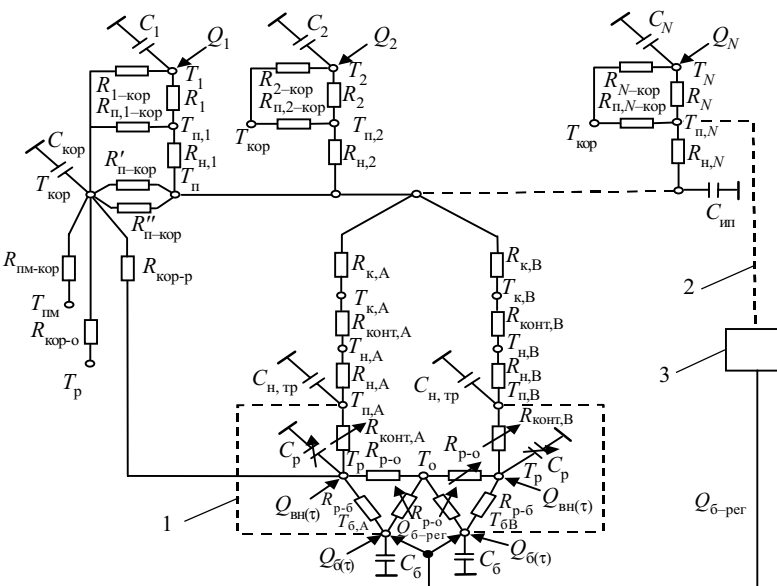


Рис. 2. Схема термических сопротивлений электронного блока: 1 — связь по балансу массы газа; 2 — связь по температуре; 3 — регулятор

является возможность существования различных по интенсивности режимов парообразования в капиллярной структуре ИП. Для режима испарения $R_{н,i} \neq f(Q_i)$, для режима кипения $R_{н,i} \approx Q_i^{0,6} F_i^{-0,4}$ (F_i — поверхность контакта с подложкой [6]).

При условии $R_{н,1} = R_{н,2} = R_{н,i} = \text{const}$ стабилизация температуры возможна за счет подбора сопротивления R_p , значение которого определяется характеристиками тепловой связи между элементом и подложкой. Общим требованием к R_p , $R_{н,i}$ является их малое абсолютное значение, т. к. точность стабилизации температуры каждого элемента ΔT_i определяется как

$$\Delta T_i = \Delta T_{п} + \Delta Q_i (R_{н,i} + R_p),$$

где $\Delta T_{п}$ — колебания температуры пара ИП; $\Delta Q_i = Q_{i,\text{max}} - Q_{i,\text{min}}$.

Колебания температуры пара ИП $\Delta T_{п}$ зависят также от функционирования внешней системы терморегулирования. При использовании активной обратной связи $\Delta T_{п}$ может быть меньше нуля, что позволяет уменьшить ΔT_i . При пассивном регулировании $\Delta T_{п} > 0$, и для уменьшения колебаний температуры необходимо понижение сопротивлений $R_{\text{конт},A}$, $R_{\text{конт},B}$, $R_{н,A}$, $R_{н,B}$ и значений $\Delta T_{п,A}$ и $\Delta T_{п,B}$, т. к.

$$T_{п} = \left(\frac{T_{п,A}}{R_{\text{конт},A} + R_{к,A} + R_{н,A}} + \frac{T_{п,B}}{R_{\text{конт},B} + R_{к,B} + R_{н,B}} + \sum_{i=1}^N Q_i \right) \times \left[\frac{R_{к,A} + R_{к,B} + R_{\text{конт},A} + R_{\text{конт},B} + R_{н,A} + R_{н,B}}{(R_{к,A} + R_{\text{конт},A} + R_{н,A})(R_{к,B} + R_{\text{конт},B} + R_{н,B})} \right].$$

Принятая для повышения надежности система дублирования ГРТТ (конструкции А и В) в номинальном режиме работы уменьшает колебания $\Delta T_{п}$. Рассмотрим крайние случаи эксплуатации.

Обе ГРТТ функционируют нормально:

$$(R_{к} + R_{\text{конт}} + R_{н})_A = (R_{к} + R_{\text{конт}} + R_{н})_B.$$

Тогда

$$T_{п} = 0,5 \sum_{i=1}^N Q_i (R_{к} + R_{\text{конт}} + R_{н})_A + 0,5(T_{п,A} + T_{п,B}). \quad (1)$$

При выходе из строя одной ГРТТ (например В за счет разгерметизации) вследствие нарушения тепловой цепи $(R_{\text{конт}} + R_{н})_B \rightarrow \infty$. Тогда

$$T_{п} = \sum_{i=1}^N Q_i (R_{к} + R_{\text{конт}} + R_{н})_A + T_{п,A}. \quad (2)$$

Сравнивая (1) и (2), можно отметить, что т. к. $T_{п,A} \approx 0,5(T_{п,A} + T_{п,B})$, значение $T_{п} - T_{п,A}$ для случая отказа ГРТТ возрастет в два раза, однако уровень стабилизации и возможности регулирования $T_{п,A}$ сохраняются.

На основе схемы, приведенной на рис. 2, проведены оценки теплового баланса блока в целом при граничных условиях эксплуатации. Установлено, что при полученных в результате конструирования значениях величин $R_{\text{пм-кор}}$ и $R_{\text{кор-о}}$ уровень стабилизации температуры ИП составляет $+30^{\circ}\text{C}$ при минимальной

мощности платы $\sum_{i=1}^N Q_i = 1 \dots 1,5 \text{ Вт}$.

Гидродинамический и теплофизический расчет характеристик капиллярно-пористой структуры [3, 7]

позволил определить конструкцию ИП и СТР. ИП представляет собой прямоугольный параллелепипед толщиной 3,8 мм. Наибольшие плоскости ИП из нержавеющей стали толщиной 0,4 мм являются крышками. Внутри ИП покрыта пористой структурой из спеченного нержавеющей волокна пористостью 80% и толщиной 0,5 мм. Соединение структур 11 на крышках (рис.1, б) осуществляется артериями, установленными по периметру ИП, а также у стержней 12, функционирующих в качестве элементов жесткости при воздействии внешнего и внутреннего давления. Схема размещения элементов на ИП представлена на рис. 1, в.

ГРТТ имеют цилиндрический корпус из нержавеющей стали диаметром 8 мм с толщиной стенки 0,3 мм. Капиллярная структура изготовлена из того же материала, что и корпус, имеет одинаковую во всех зонах толщину (0,85 мм) и пористость (80%). Баллон диаметром 50 и длиной 40 мм имеет структуру толщиной 1 мм на кольцевой части и доньшках, а также артерию, соединяющую структуры баллона и зону конденсации. Для уменьшения габаритных размеров баллон углублен за плоскость радиатора. В зоне нагрева ГРТТ размещен фланец шириной 30 и длиной 130 мм. Зоны конденсации ГРТТ впаяны в радиатор-излучатель, изготовленный из дискретных элементов шириной 10 мм (14 шт.) и 5 мм (5 шт.). На неизлучающей стороне радиатора имеются узлы крепления низкотеплопроводных стоек. На радиатор и баллоны устанавливались пленочные нагреватели, а затем они покрывались эмалью АК-573 для достижения соответствующих оптических характеристик.

В состав блока также входил малогабаритный регулятор температуры, который подавал на баллоны ГРТТ электрическую мощность в зависимости от согласования показаний датчика, установленного на ИП, и датчика регулятора.

Конструкция блока с изотермической подложкой и системой термостатирования прошла комплекс термовакuumных и механических испытаний. Для определения теплотехнических характеристик узлов блока были предусмотрены шесть датчиков температур непосредственно на ИП под различными тепловыделяющими элементами, шесть датчиков на стыке зоны конденсации ИП и зон нагрева ГРТТ (по три на каждую ГРТТ), два датчика, измеряющие температуру транспортной зоны ГРТТ, 15 датчиков на радиаторе и два на баллонах.

Имитация внешних возмущений осуществлялась в соответствии с рекомендациями и с методикой [3] с помощью электронагревателей, установленных на баллонах и радиаторе с излучающей стороны. Была выбрана схема, представленная на рис. 3. Здесь $Q_{\text{ГРТТ}}$ — поток, отводимый ГРТТ; $Q_{\text{из}}$ — потери через теплоизоляцию.

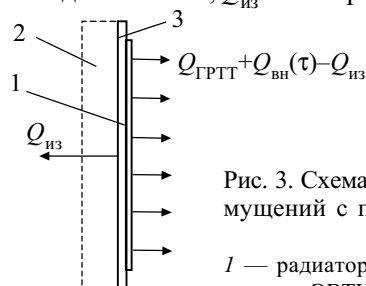


Рис. 3. Схема имитации внешних возмущений с помощью электронагревателей:

1 — радиатор; 2 — тепловая изоляция ЭВТИ; 3 — нагреватель

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ АППАРАТУРЫ

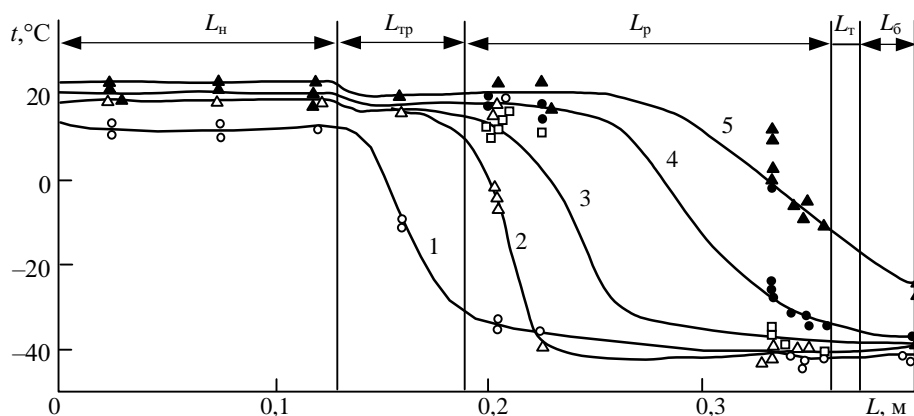


Рис. 4. Распределение температур по длине газорегулируемой тепловой трубы при различной мощности тепловыделения на ИП ($Q_{ип}$):
1 — при $Q_{ип}=1$ Вт; 2 — 3 Вт; 3 — 5 Вт; 4 — 7 Вт; 5 — 10 Вт

Перед термовакуумными испытаниями ИП была исследована автономно в нормальных условиях для более детального анализа температурного поля. Отвод тепла осуществлялся от зон конденсации с помощью водяных теплообменников с температурой охлаждающей среды $+40^{\circ}\text{C}$. Исследовались влияние положения подложки относительно сил гравитации, особенности функционирования при одностороннем отводе тепла, влияние уровня тепловыделения элементов. Установлено, что изменение положения в горизонтальной плоскости (резисторы сверху или снизу) не оказывает влияния на температуру элементов (с точностью $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$). При вертикальном положении ИП (превышение нижней и верхней точек 180 мм) температуры элементов и парового пространства сохраняются на том же уровне. Если отключен верхний конденсатор, сопротивление “пар-конденсатор” несколько возрастает за счет слива избытка жидкости. При функционировании только верхнего конденсатора сопротивление “пар-конденсатор” уменьшается за счет уменьшения толщины пленки жидкости на поверхности структуры. Термическое сопротивление для наиболее горячего резистора между телом резистора и паром составило приблизительно 38 К/Вт.

Испытания в вакуумной камере проводились при вертикальном положении ИП. В этом случае плоскость изгиба ГРТТ находится в горизонтальной плоскости, что приближает условия испытаний к эксплуатации в невесомости. Для ИП это положение является наихудшим из условий теплопереноса, т. к. необходимо осуществлять подъем или удержание теплоносителя в капиллярной структуре на определенной высоте.

На рис. 4 представлены первичные данные — распределение температуры по длине ГРТТ при эффективной температуре радиатора и баллона $T_{эф} = -40^{\circ}\text{C}$. Эксперименты проведены также при значениях $T_{эф} -60^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C}, +15^{\circ}\text{C}$, соответствующих различным уровням внешних возмущений $Q_{вн}$. На рисунке показаны зоны нагрева ГРТТ ($L_{н}$), транспорта ($L_{тр}$), радиатора ($L_{р}$), соединительной трубки ($L_{т}$), баллона ($L_{б}$).

Расхождение температур каждой ГРТТ в зоне нагрева ($T_{н,А}, T_{н,В}$) и транспорта ($T_{т,А}, T_{т,В}$) составляет

1—3 $^{\circ}\text{C}$ и обусловлено неточностями при заполнении неконденсирующимся газом. Термическое сопротивление перехода “стенка—пар” в зоне нагрева для ГРТТ составило 0,4 К/Вт. Минимальная мощность начала регулирования для двух ГРТТ находится в диапазоне 1,0...1,5 Вт, максимальная — по условиям регулирования взаимосвязана со значением внешних возмущений, а по условиям передачи теплового потока составляет 15 Вт на каждую ГРТТ.

На рис. 5 представлены обобщенные характеристики регулирования — зависимости температур наиболее горячего элемента подложки ($Q_{max}=0,1Q_{ип}$), наименее горячего элемента ($Q_{min}=0,011Q_{ип}$), фланцев зоны нагрева от подводимой к ИП мощности при различных уровнях внешних возмущений $T_{эф} (-60^{\circ}\text{C}, -40^{\circ}\text{C}, 0^{\circ}\text{C})$.

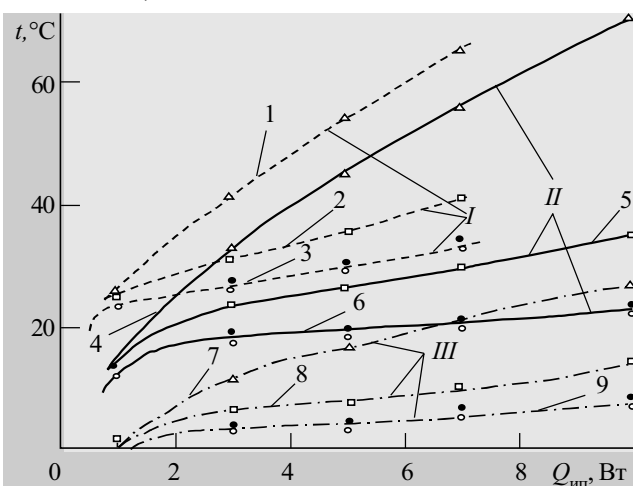


Рис. 5. Характеристики регулирования ИП с СТР:
I — $T_{эф} = 0^{\circ}\text{C}$; II — $T_{эф} = -40^{\circ}\text{C}$; III — $T_{эф} = -60^{\circ}\text{C}$
1, 4, 7 — максимальное значение температуры подложки; 2, 5, 8 — минимальное значение температуры подложки; 3, 6, 9 — средние температуры фланцев ГРТТ (А — светлые кружки, В — черные кружки)

При постоянном значении $T_{эф}$ чувствительность СТР к изменению нагрузки $Q_{ип}$ составляет 2 Вт/ $^{\circ}\text{C}$ для фланцев ГРТТ. Для элементов платы это значение существенно уменьшается: до 0,2 Вт/ $^{\circ}\text{C}$ для наиболее горячего элемента и до 0,4 Вт/ $^{\circ}\text{C}$ для наименее горячего элемента. Точность, обеспечиваемая ИП совместно с СТР, функционирующей в пассивном режиме, составит: $23 \pm 10^{\circ}\text{C}$ для элементов, установленных на фланцах ГРТТ; $40 \pm 25^{\circ}\text{C}$ для радиоэлементов с тепловыделением $0,1Q_{ип}$ и плотностью тепловыделения до $0,9 \text{ Вт/см}^2$; $28 \pm 13^{\circ}\text{C}$ для радиоэлементов с тепловыделением $0,01Q_{ип}$ и плотностью тепловыделения до $0,6 \text{ Вт/см}^2$. При этом температура посадочных мест прибора изменяется в пределах $-20 \dots +50^{\circ}\text{C}$, суммарная мощность тепловыделения

на изотермической подложке $Q_{\text{ип}}=1...7$ Вт, внешние возмущения соответствуют эффективной температуре радиатора в диапазоне $-40...0^{\circ}\text{C}$.

Расчетные значения температур в зонах ГРТТ и на корпусе плоской ТТ согласуются между собой в пределах 4°C . Большие отклонения, достигающие 10°C , наблюдаются для температур тепловыделяющих элементов из-за неопределенности в оценке контактного сопротивления “элемент-подложка”.

Расчетные соотношения для составляющих теплового баланса всего блока при минимальных и максимальных значениях мощности и температуры посадочных мест подтверждены экспериментом.

На рис. 6 представлены некоторые результаты исследования функционирования СТР с включением обратной электрической связи по температуре подложки.

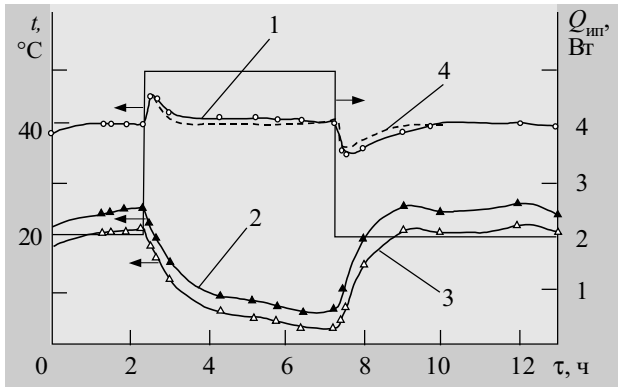


Рис. 6. Работа системы терморегулирования совместно с регулятором при изменении мощности тепловыделения подложки:

1 — средняя температура ИП; 2, 3 — температура баллонов ГРТТ; 4 — расчет по [8] ($T_{\text{эф}} \approx 0^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{пм}} = 50^{\circ}\text{C}$)

В конструкции ИП предусмотрен датчик, установленный в центре подложки. Он фиксирует температуру, среднюю между температурой окружающих элементов и парового канала подложки. При включении регулятора происходит подъем уровня температуры подложки до установленного (с 28 до 40°C) за счет увеличения температуры баллонов ГРТТ. При увеличении мощности на плате с 2 до 5 Вт температура подложки повышается и отключается нагрев баллонов. При понижении их температуры уменьшается температура пара в ГРТТ $T_{\text{п,А}}$, $T_{\text{п,В}}$ на значение порядка $\Delta Q(R_{\text{н,А}} + R_{\text{конт,А}} + R_{\text{к,А}})0,5$ (рис. 2) — с тем, чтобы средняя температура подложки оставалась постоянной.

Если датчик установлен на наиболее ответственном элементе, то температура подложки будет меняться с учетом термического сопротивления $R_i + R_{\text{н,и}}$. Температурный диапазон компенсации этим способом ограничен затратами энергии на изменение температуры баллонов, максимальной температурой баллона, определяемой внешними возмущениями. В соответ-

ствии с теорией [8, с. 198—202], изменение температуры источника тепла определяется по зависимости

$$T_{\text{ип,т}} - T_{\text{ип,нач}} = \Delta T_{\text{п,ГРТТ}} (1 - \tau_{\text{ип}} / \tau_0)^{-1} [\exp(-\tau / \tau_0) - \exp(-\tau / \tau_{\text{ип}})], \quad (5)$$

где $\Delta T_{\text{п,ГРТТ}}$ — требуемое изменение температуры пара в ГРТТ; $\tau_{\text{ип}}$, τ_0 — постоянные времени ИП и баллона ГРТТ, соответственно.

Расчет по зависимости (5) показал достаточно хорошее совпадение с экспериментом. Значения имеющихся локальных экстремумов в температуре ИП согласуются с теоретическим расчетом по [8].

Экспериментальные исследования блока проведены также для режима циклического воздействия внешних возмущений по методике [3, с. 56].

Разработанная конструкция ИП совместно с СТР была подвергнута комплексным механическим испытаниям. Характеристики всех узлов сохранились.

Проведенный комплекс исследований показал эффективность радиоэлектронных блоков, охлаждение элементов которых осуществляется с помощью тепловых труб. Соединение изотермических подложек с системой терморегулирования позволяет существенно сузить диапазон колебаний температур элементов, уменьшить уровень их рабочей температуры, что благоприятно сказывается на повышении надежности и стабильности их характеристик.

Дальнейшее развитие систем данного типа может быть связано с улучшением технических характеристик системы, с решением задач по термостабилизации элементов с существенно отличающимся тепловыделением.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Воронин В. Г., Ревякин А. В., Сасин В. Я., Тарасов В. С. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов.— М.: Машиностроение, 1976.
2. Алексеев В. А., Арефьев В. А. Тепловые трубы для охлаждения и термостатирования радиоэлектронной аппаратуры.— М.: Энергия, 1979.
3. Батуркин В. М., Дудеев А. А., Гречина Н. К., Шкода К. Н. Исследование характеристик системы терморегулирования электронного блока с применением тепловой трубы переменного термического сопротивления / В кн.: Конструирование и технология изготовления космических приборов.— М.: Наука, 1987.— С. 44—57.
4. Дульнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах.— Л.: Энергия, 1968.
5. Дульнев Г. Н., Беляков А. П. Тепловые трубы в электронных системах стабилизации температуры.— М.: Радио и связь, 1985.
6. Семена М. Г., Зарипов В. К., Шаповал А. А. Интенсивность теплообмена при кипении на поверхности с пористыми покрытиями в условиях капиллярного транспорта // Инж.-физ. журн.— 1987.— Т. 52, № 4.— С. 592—597.
7. Семена М. Г., Колосовский М. О., Малкина И. Э. Максимальная теплопередающая способность артериальных труб // Пром. теплотехника.— 1980.— Т. 2, № 4.— С. 66—71.
8. Дан П. Д., Рей Д. А. Тепловые трубы.— М.: Энергия, 1979.