

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПРИБОРНОГО ОТСЕКА ФОТОРАЗВЕДЧИКА**

© 2011 В. Н. Николаев

ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина»

Разработана математическая модель теплового состояния отсека приборного продуваемого теплоизолированного отсека самолёта-фоторазведчика. Решены прямая и обратная задачи теплообмена, определены доверительные интервалы оценок параметров.

Математическая модель, прямая задача, обратная задача, тепловое состояние, бортовое оборудование, система обеспечения теплового режима, приборный отсек.

Проведение лётных и стендовых испытаний бортового оборудования, расположенного в приборном продуваемом теплоизолированном отсеке самолёта, требует математического моделирования теплового состояния такого отсека.

Приборный отсек фоторазведчика представляет собой негерметизированный отсек с теплоизолированной обшивкой, продуваемый воздухом из системы обеспечения теплового режима. Воздух охлаждает расположенное в отсеке оборудование. Блоки бортового оборудования разделены воздушными прослойками.

Математическую модель приборного продуваемого теплоизолированного отсека с системой обеспечения теплового режима представим системой одномерных уравнений теплоизолированной обшивки и обыкновенных дифференциальных уравнений теплообмена внутренней поверхности теплоизоляции обшивки, бортового оборудования, воздуха и переноса энтальпии из системы обеспечения теплового режима.

Уравнения теплообмена обшивки представим в виде одномерных уравнений теплопроводности, описывающих процесс передачи тепла в многослойной конструкции:

$$C_{cv}(x)T_{cv,t} = (\lambda_{cv}(x, T_{cv})T_{cv,x})_x, \quad 0 < x < l; \quad (1)$$

$$\lambda_{cv}(x, T_{cv})F_{cv}T_{cv,x} = \alpha_{cv,out}(t)F_{cv}(T_e(t) - T_{cv}(t, x)) + Q_{cv,out} - c_0 \varepsilon_{cv,out} F_{cv,out} T_{cv}^4(t), \quad x = 0; \quad (2)$$

$$\lambda_{cv}(x, T_{cv})F_{cv}T_{cv,x} = \alpha_{cv,in}(t)F_{cv}(T_{air}(t) - T_{cv}(t, x)) + \sum_j g_{j,cv} T_j^4 / T_{ms}^4 - c_0 \varepsilon_{cv,in} F_{cv,in} T_{cv}^4(t) + Q_{cv,in}; \quad x = l; \quad (3)$$

$$T_{cv}(0, x) = T_0(x), \quad 0 < x < l, \quad (4)$$

где $C_{cv}(x) = C_i$, $\lambda_{cv}(x, T_{cv}) = \lambda_{i,0} + \lambda_{i,1}T_{cv}$

при $l_{i-1} \leq x < l_i$, ($i = 1, \dots, k-1$),

$C_{cv}(x) = C_k$, $\lambda_{cv}(x, T_{cv}) = \lambda_{k,0} + \lambda_{k,1}T_{cv}$

при $l_{k-1} \leq x \leq l_k$, то есть C_{cv} , λ_{cv} зависят от того, в каком слое рассматривается перенос тепла.

При этом $0 = l_0 < l_1 < \dots < l_k = l$.

В уравнениях (1)...(4) использованы следующие обозначения:

$T_{cv}(x, t)$ — температура многослойной конструкции; $T_{cv,t}$ — первая производная T_{cv} по t ; $T_{cv,x}$ — первая производная T_{cv} по x ; $T_{cv,xx}$ — вторая производная T_{cv} по x ; $C_{cv}(x)$ — объёмная теплоёмкость многослойной конструкции обшивки (произведение удельной теплоёмкости на плотность); $\lambda_{cv}(l, T)$ — теплопроводность многослойной конструкции; $\alpha_{cv,out}$ — коэффициент теплоотдачи наружной поверхности конструкции; $\alpha_{cv,in}$ — коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности конструкции; F_{cv} — площадь конст-

рукции при наружном и внутреннем теплообмене; $Q_{cv,out}$ — тепловая энергия внешних источников; $Q_{cv,in}$ — тепловая энергия внутренних источников; c_0 — постоянная Стефана-Больцмана; $\varepsilon_{cv,in}$ — степень черноты излучения внутренней поверхности многослойной конструкции; $g_{j,cv}$ — коэффициент радиационного теплообмена системы « j -й элемент отсека – многослойная конструкция»; T_e — температура восстановления; t — время; T_{air} — температура воздушной среды в отсеке или в части отсека; T_j — температура j -го элемента отсека; l — толщина многослойной конструкции.

Коэффициенты теплоотдачи $\alpha_{cv,out}$ и $\alpha_{cv,in}$ для рассматриваемых условий пока не представляется возможным определять по критериальным соотношениям [1]. Поэтому их предлагается определять из уравнений

$$\alpha_{cv,out} = \mathfrak{G}_{1,out} J_{out}^{\mathfrak{G}_{2,out}}(t); \quad (5)$$

$$\alpha_{cv,in} = \mathfrak{G}_{1,in} J_{in}^{\mathfrak{G}_{2,in}}(t), \quad (6)$$

где J_{out} , J_{in} — модуль массовой скорости воздушной среды за бортом и в отсеке соответственно; $\mathfrak{G}_{1,out}$, $\mathfrak{G}_{2,out}$, $\mathfrak{G}_{1,in}$, $\mathfrak{G}_{2,in}$ — оцениваемые коэффициенты модели.

Уравнение теплообмена бортового оборудования представим в виде обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего его конвективный теплообмен с воздухом и конвективно-лучистый теплообмен с окружающими конструкциями:

$$T_{m,t} = \alpha_{air,m}(t) F_{air,m} / C_m (T_{air}(t) - T_m) + \sum_m g_{j,m} / C_m T_j^4(t) / T_m^4 - c_0 \varepsilon_m F_m / C_m T_m^4 + Q_m / C_m, \quad (7)$$

где T_m — температура m -го бортового оборудования; $T_{m,t}$ — первая производная T_m по

t ; $\alpha_{air,m}$ — коэффициент теплоотдачи m -го бортового оборудования; $F_{air,m}$ — площадь m -го бортового оборудования при конвективном теплообмене; C_m — теплоёмкость m -го бортового оборудования; $g_{j,m}$ — коэффициент радиационного теплообмена системы « j -й элемент отсека – m -й блок бортового оборудования»; ε_m — степень черноты излучения m -го блока; Q_m — энергия тепловыделения или теплопоглощения m -м бортовым оборудованием от системы обеспечения теплового режима и преобразованная из электрической энергии.

Коэффициент теплоотдачи $\alpha_{air,i}$ для рассматриваемых условий пока также не представляется возможным определять по критериальным соотношениям. Поэтому их предлагается определять из уравнения

$$\alpha_{air,i} = \mathfrak{G}_{1,i} J^{\mathfrak{G}_{2,i}}(t), \quad (8)$$

где $\mathfrak{G}_{1,i}$, $\mathfrak{G}_{2,i}$ — оцениваемые коэффициенты модели.

Уравнение теплообмена воздушной среды представим в виде обыкновенного дифференциального уравнения, описывающего конвективный теплообмен внутренней поверхности теплоизоляции обшивки, элементов отсека и перенос энтальпии из одной части отсека в другую:

$$T_{air,k,t} = \alpha_{cv,in}(t) F_{cv} / C_{air,k} [T_{cv}(t, x) - T_{air,k}] + \sum_j \alpha_{air,j} F_{air,j} / C_{air,k} (T_j - T_{air,k}) + c_p J_{air,k} F_k / C_{air,k} (T_{air,k-1} - T_{air,k}); \quad x = l, \quad (9)$$

где $T_{air,k-1}$, $T_{air,k}$ — температуры воздушного потока соответственно в $(k-1)$ -ой и k -ой частях отсека; $J_{air,k}$ — массовая скорость воздушного потока в k -ой части отсека; F_k — суммарная площадь воздушных каналов в k -ой части отсека; c_p — удельная теп-

лоёмкость воздуха; $C_{air,k}$ — теплоёмкость воздуха в k -ой части отсека.

$T_{air,k}$ в выражении (9) с индексом t означает её дифференцирование по времени t .

Суммирование в уравнении (9) ведётся по j -ому элементу, входящему в k -ю часть отсека.

Теплоёмкость воздуха $C_{air,k}$ определяется по выражению

$$C_{air,k} = c_p \rho_{air,k} (W_{air,ent} F_{air,ent} \Delta t + V_{air,k}), \quad (10)$$

где $\rho_{air,k}$ — плотность воздуха в k -ой части отсека; $W_{air,ent}$ — скорость воздуха на входе в отсек; $F_{air,ent}$ — площадь воздушных каналов на входе в первую часть отсека; Δt — интервал дискретизации времени при решении системы дифференциальных уравнений; $V_{air,k}$ — объём воздуха в k -ой части отсека.

Коэффициент радиационного теплообмена в уравнениях (3), (7) определяется методом Монте-Карло [2].

Для решения прямой задачи теплового состояния отсека одномерные уравнения (1)...(4) для теплоизолированной обшивки дискретизируются по пространственной переменной по методу Галёркина, использующему кусочно-линейный базис. В результате применения этого метода решение уравнений (1)...(4) сводится к численному решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений, неизвестными которой являются значения температуры в узлах заданной сетки на отрезке $[0, l]$. Полученные таким образом обыкновенные дифференциальные уравнения для многослойных конструкций (1)...(4) уравнения для бортового оборудования (7) и воздушной среды (9) составляют жёсткую систему дифференциальных уравнений, которую в общем виде можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} Y_t &= F(Y(t, \Theta)), t \in (0, t_i); \\ Y_t &= Y_\Theta, F, Y \in R^S; \quad \Theta \in R^r, \dots \end{aligned} \quad (11)$$

где $Y = [T_1, T_2, T_i, T_\Theta, \dots]^T$ — вектор параметров теплового состояния отсека; Y_t — вектор первых производных Y по t ; $\Theta = [\vartheta_1, \vartheta_2, \dots, \vartheta_4]^T$ — вектор коэффициентов модели; T — верхний индекс, обозначающий операцию транспонирования.

Для решения уравнений (11) предлагается использовать следующую численную схему типа Розенброка второго порядка аппроксимации для неавтономных систем [3].

Решение обратной задачи, то есть оценивание коэффициентов Θ модели сводится к минимизации взвешенной суммы квадратов невязок между заданными по принятому критерию значениями Z^* и соответствующими значениями $Z(Y(t, \Theta))$, полученными в ходе расчётов по уравнениям модели:

$$\Phi(\Theta) = \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^S \Gamma_{k,i} (Z_{k,i}^* - Z_i(Y(t_k, \Theta)))^2, \quad (12)$$

где $\Gamma_{k,i}$ — весовые коэффициенты; t_k — моменты времени при $k = 1, \dots, N$.

Как было отмечено в работе [2], для минимизации функции (12) целесообразно использовать квазиньютоновский метод Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шэнно в сочетании с методом Ньютона [4].

Доверительные интервалы оценок коэффициентов Θ нелинейной математической модели теплового состояния отсека вида (8) могут быть определены с помощью ковариационной матрицы $P(\Theta)$ ошибок оценок Θ искомым коэффициентов модели (последние характеризуют отклонения вычисленных коэффициентов модели от действительных значений). При этом используется метод проецирования совместной доверительной области оценок на координатные оси пространства коэффициентов [5].

Компоновка приборного отсека фоторазведчика представлена на рис. 1. При этом воздух, подаваемый из системы обеспечения теплового режима, перетекает из хвостовой части отсека в носовую.

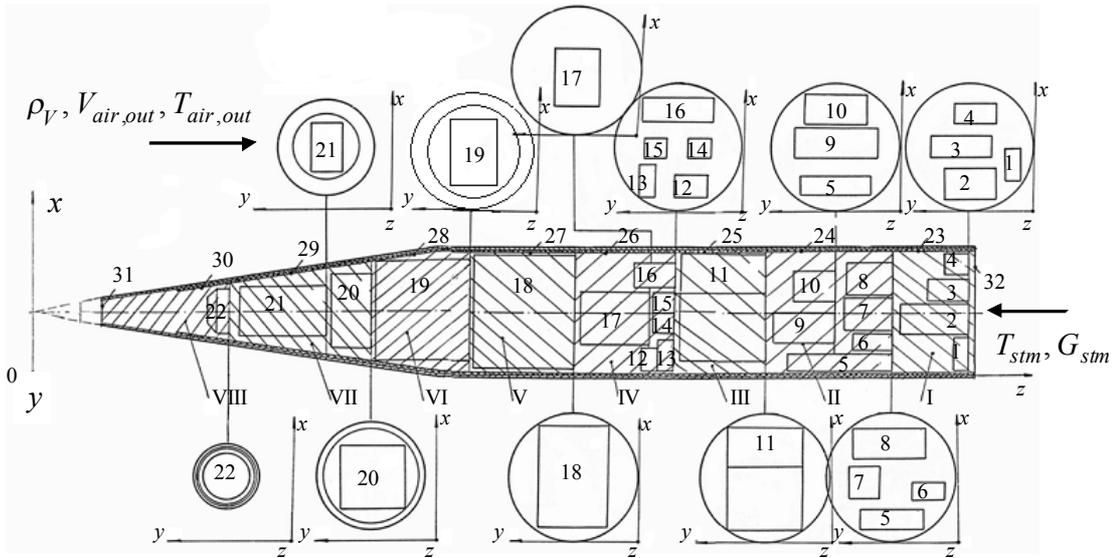


Рис. 1. Компоновка негерметизированного продуваемого теплоизолированного отсека: I...VIII — части отсека; 1...22 — блоки бортового оборудования; 23...31 — части обшивки;

x, y, z — координаты; ρ_V — плотность воздушной среды за бортом;

$V_{air,out}$ — воздушная скорость полёта; $T_{air,out}$ — температура воздушной среды за бортом;

T_{stm} — температура воздуха на выходе системы обеспечения теплового режима;

G_{stm} — расход воздуха на выходе системы обеспечения теплового режима

Характеристики размещённых в отсеке блоков бортового оборудования приведены в таблице 1.

Толщина обшивки I - V частей отсека равна $l_{I-V} = 2 \cdot 10^{-3}$ м, VI - VIII частей — $l_{VI-VIII} = 4 \cdot 10^{-3}$ м. Толщина теплоизоляции обшивки равна $l_{ins} = 2 \cdot 10^{-2}$ м. Коэффициент теплопроводности обшивки I - V частей отсека равна $\lambda_{I-V} = 2,11 \cdot 10^2$ Вт/(м·К), а VI - VIII частей — $\lambda_{VI-VIII} = 1,63 \cdot 10^{-1}$ Вт/(м·К). Коэффициент теплопроводности теплоизоляции обшивки определяется по формуле

$$\lambda_{ins} = - 3,6 \cdot 10^{-2} + 2,8 \cdot 10^{-4} T_{ins}. \quad (13)$$

Параметрическую идентификацию проведём по измеренным в отсеке температурам поверхности блока № 16 и внутренней поверхности теплоизоляции обшивки в районе блока № 16. При этом будем использовать

результаты измерений для холодного типа климата в типовом режиме полёта фоторазведчика (рис. 2) с переменным интервалом дискретизации по времени $\Delta t = 10 \dots 300$ с. Расход воздуха, выходящего из системы обеспечения теплового режима, был принят $G_{stm} = 1$ кг/с, температура $T_{stm} = 288$ К.

Оценки $\hat{\Theta}$ и доверительные интервалы \bar{I}_{Θ} коэффициентов для доверительной вероятности $\beta = 0,95$ имеют следующие величины:

$$\hat{\Theta} = [0,3674 \ 0,4238 \ 0,0180 \ 0,9872 \ 0,6998 \ 0,6102]^T;$$

$$\bar{I}_{\Theta} = [0,0390 \ 0,0622 \ 0,0017 \ 0,1124 \ 0,0633 \ 0,5317]^T.$$

Доверительные интервалы погрешностей измерения температуры поверхностей в отсеке и температуры воздушной среды за

Таблица 1. Характеристики блоков бортового оборудования фоторазведчика

Номер части отсека	Номер блока бортового оборудования	Площадь теплоотдающей поверхности блока, $F_{air,i}$, м ²	Масса блока m , кг	Энергия тепловыделения блоком Q_i , Вт
I	1	0,081	1,0	0
	2	0,330	3,5	41
	3	0,230	18,0	1200
	4	0,124	2,5	180
II	5	0,488	10,0	100
	6	0,125	8,6	378
	7	0,180	8,5	27
	8	0,325	8,5	66
	9	0,450	10,0	38
	10	0,249	6,0	60
III	11	1,005	35,0	463
IV	12	0,105	3,0	50
	13	0,081	1,0	0
	14	0,054	8,0	0
	15	0,054	8,0	0
	16	0,273	4,5	146
	17	0,762	25,0	400
V	18	1,151	36,0	430
VI	19	0,984	40,0	285
VII	20	0,530	14,0	15
	21	0,390	12,0	600
VIII	22	0,118	3,3	15

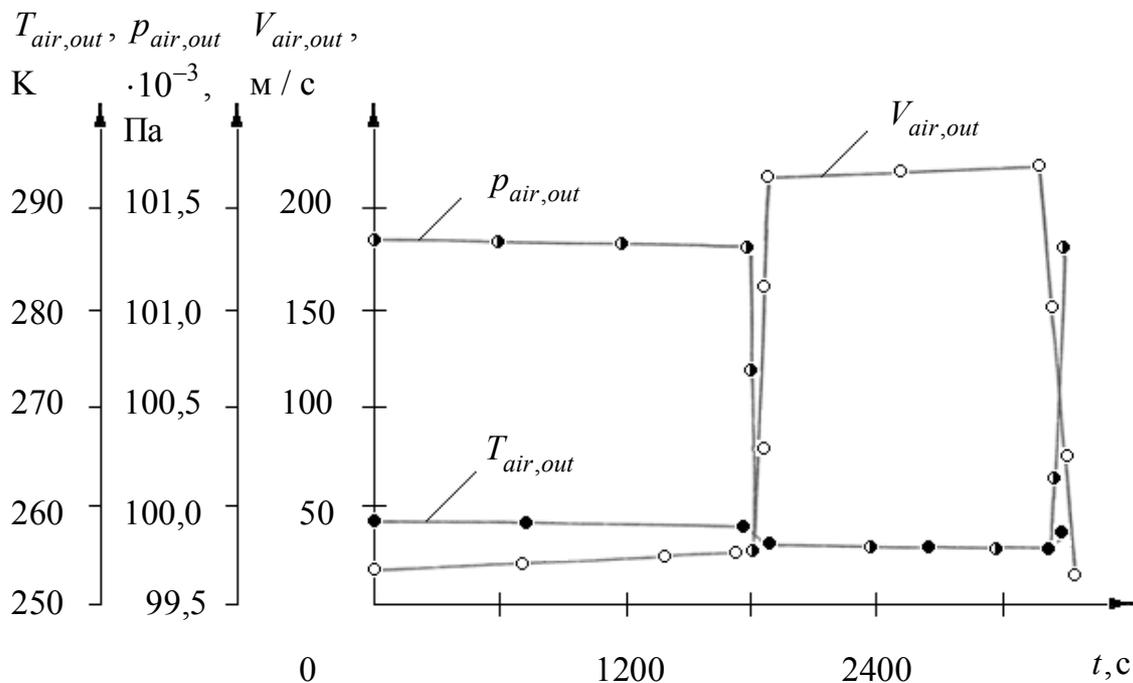


Рис. 2. Параметры режима полёта и воздушной среды за бортом фоторазведчика для холодного типа климата: $P_{air,out}$ — давление воздуха за бортом; $T_{air,out}$ — температура воздуха за бортом; $V_{air,out}$ — воздушная скорость полёта.

бортом не превышали 3 К при доверительной вероятности $\beta = 0,95$, а погрешностей индикаторной земной скорости и высоты полёта – 3 %.

С целью экспериментальной проверки предложенной модели на различных режимах полёта и воздушной среды за бортом, а также на элементах приборного отсека рассчитанные по модели температуры элементов отсека сравнивались с измеренными значениями.

Измеренные T_{eq} и рассчитанные по модели \hat{T}_{eq} значения температуры поверхности для холодного типа климата при режиме полёта и воздушной среды за бортом, представленных на рис. 2, для блоков № 16 и № 6 приведены на рис. 3. Для тёплого типа климата при режиме полёта и воздушной

среды за бортом, представленных на рис. 4, приведены на рис. 5. Разность между экспериментальными и рассчитанными по модели значениями температуры в этих случаях меньше 3 К. Эта величина не превышает доверительного интервала погрешности измеренной температуры.

Анализ остатков по критерию перестановки [6] показал, что их можно считать случайными, а анализ функций распределения остатков по критерию согласия Колмогорова-Смирнова – что они описываются нормальным законом с доверительной вероятностью $\beta = 0,32...0,57$.

Следовательно, построенная математическая модель теплового состояния приборного отсека адекватна реальному тепловому состоянию негерметичного продуваемого теплоизолированного отсека фоторазведчика.

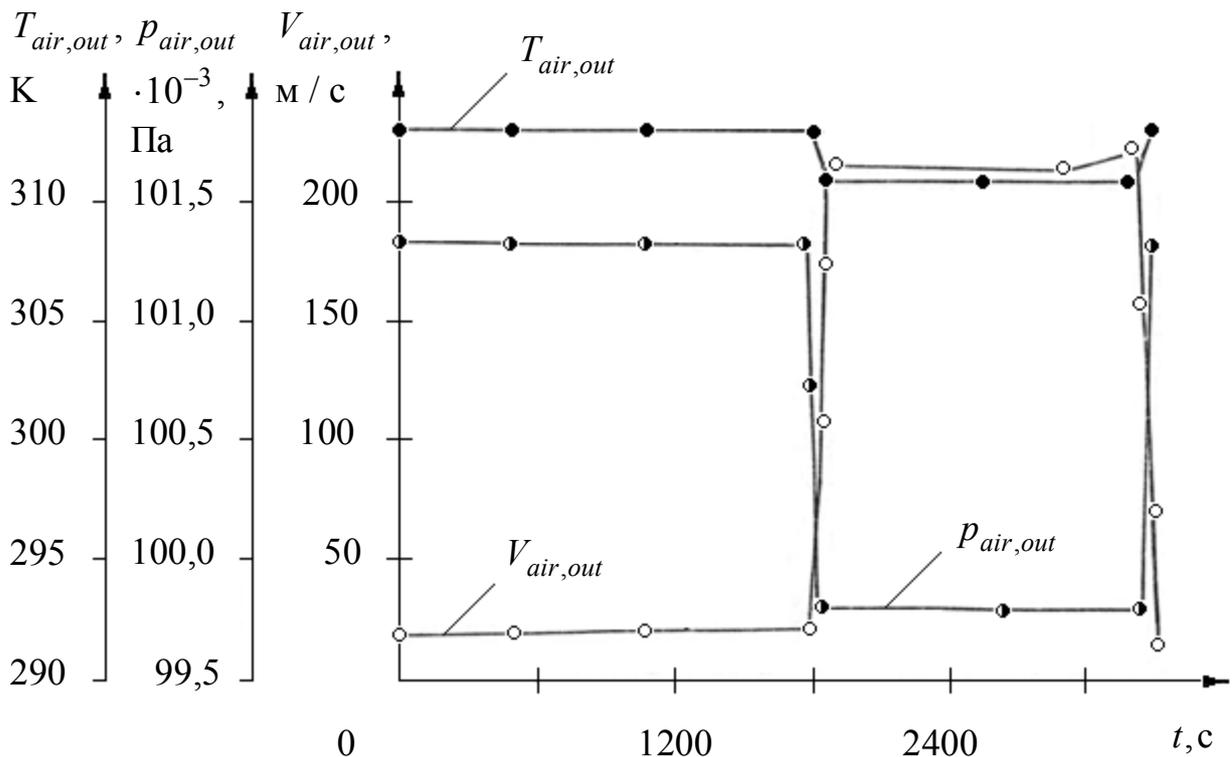


Рис. 3. Измеренные и рассчитанные температуры поверхностей в отсеке фоторазведчика для холодного типа климата: $T_{eq,6}$ — измеренная и $\hat{T}_{eq,6}$ — рассчитанная температуры поверхности блока № 6; $T_{eq,16}$ — измеренная и $\hat{T}_{eq,16}$ — рассчитанная температуры поверхности блока № 16; $T_{ins,IV}$ — измеренная температура внутренней поверхности теплоизоляции обшивки в части отсека IV в районе блока № 16.

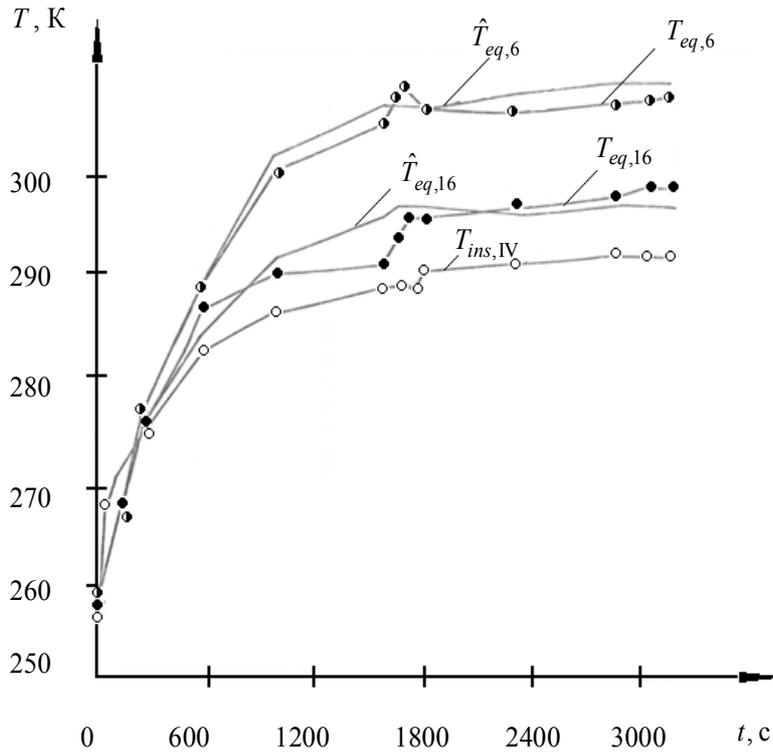


Рис. 4. Параметры режима полёта и воздушной среды за бортом фоторазведчика

для тёплого типа климата: $P_{air,out}$ — давление воздуха за бортом;

$T_{air,out}$ — температура воздуха за бортом; $V_{air,out}$ — воздушная скорость полёта

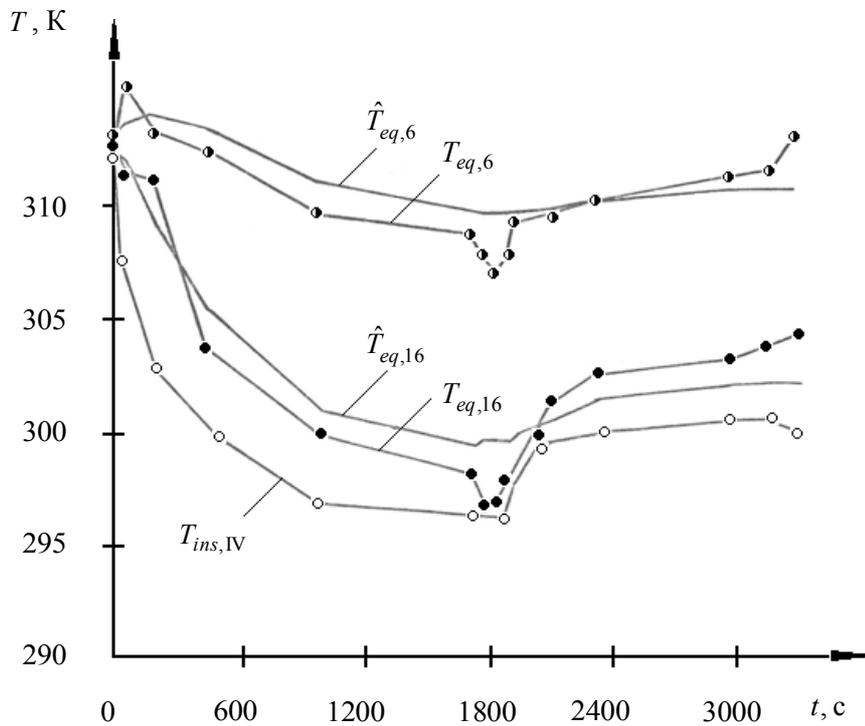


Рис. 5. Измеренные и рассчитанные температуры поверхностей в отсеке фоторазведчика

для тёплого типа климата: $T_{eq,6}$ — измеренная и $\hat{T}_{eq,6}$ — рассчитанная температуры поверхности

блока № 6; $T_{eq,16}$ — измеренная и $\hat{T}_{eq,16}$ — рассчитанная температуры поверхности блока № 16;

$T_{ins,IV}$ — измеренная температура внутренней поверхности теплоизоляции обшивки

в части отсека IV в районе блока № 16

Библиографический список

1. Малозёмов, В. В. Тепловой режим космических аппаратов [Текст] / В. В. Малозёмов. - М.: Машиностроение, 1980. - 232 с.
2. Николаев, В. Н. Математическая модель конвективно-лучистого теплообмена продуваемого теплоизолированного негерметичного отсека летательного аппарата [Текст] / В. Н. Николаев, С. А. Гусев, О. А. Махоткин // Расчёт на прочность элементов авиационных конструкций. Серия прочность летательных аппаратов: Научно-технический сборник. - Новосибирск: СибНИА. - 1996. Выпуск 1. - С. 98-108.
3. Артемьев, С. С. Минимизация овражных функций численным методом для решения жестких систем уравнений [Текст] / С. С. Артемьев, Г. В. Демидов, Е. А. Новиков - Новосибирск, 1980. 13 с. (Препринт // ВЦ СО АН СССР, № 74).
4. Gill P., Murray E. Quasi-Newton methods for unconstrained optimization // Journal of the institute of mathematics and its applications. 1971. v.9, № 1. P. 91-108.
5. Николаев, В. Н. Доверительные области результатов параметрической идентификации процессов теплообмена бортового оборудования самолёта [Текст] / В. Н. Николаев, Д. Ф. Симбирский // Методы и средства исследования внешних воздействующих факторов на бортовое оборудование летательных аппаратов. - Новосибирск: СибНИА. - 1991. Выпуск 2. - С. 11-15.
6. Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами [Текст] / Д. Химмельблау. -М.: Мир, 1973. - 957 с.

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE PHOTOGRAPHIC RECONNAISSANCE PLANE INSTRUMENT BAY THERMAL STATE

© 2011 V. N. Nikolayev

Federal State Unitary Enterprise "S. A. Chaplygin Siberian Aeronautical Research Institute"

A mathematical model of the venting heat-insulated instrument bay of the photographic reconnaissance plane thermal state is developed. Direct and inverse problems of heat exchange are solved, confidence intervals of estimated parameters are determined.

Mathematical model, direct problem, inverse problem, thermal state, airborne equipment, thermal conditions support system, instrument bay.

Информация об авторе

Николаев Владимир Николаевич, кандидат технических наук, начальник сектора ФГУП «Сибирского научно – исследовательского института авиации им. С.А. Чаплыгина». E-mail: nikvla50@mail.ru. Область научных интересов: математическое моделирование теплового состояния отсеков и систем самолёта при проектировании, лётных испытаниях и математическое моделирование электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования самолёта.

Nikolayev Vladimir Nikolayevitch, candidate of technical sciences, head of a sector at the Federal State Unitary Enterprise "S. A. Chaplygin Siberian Aeronautical Research Institute". E-mail: nikvla50@mail.ru. Area of research: mathematical simulation of the thermal state of aircraft bays and systems during development work and flight tests, mathematical simulation of electromagnetic compatibility of aircraft radioelectronic equipment.