

К. т. н. Г. С. РАНЧЕНКО, к. т. н. В. И. ПЕРЕПЕКА,  
В. М. ГРУДИНКИН, А. Г. БУРЯЧЕНКО

Украина, г. Одесса, ОАО «Элемент»  
E-mail: odessa@element.od.ua, element-tech@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
27.03 2008 г.

Оппонент д. т. н. В. Т. ДЕЙНЕГА  
(НИИ «Шторм», г. Одесса)

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ БЛОКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ СИД-3-148

*Приведены методика и результаты моделирования тепловых режимов блока, установленного в подкапотном пространстве двигателя самолета Ан-148. Моделирование выполнено с использованием данных, полученных в ходе сертификационных испытаний самолета.*

Выполнение оценки тепловых режимов работы блока СИД-3-148 — системы измерения давления, предназначенной для эксплуатации на борту самолета Ан-148 в составе газотурбинного двигателя Д-436-148, являлось важной составной частью обеспечения надежности указанной системы. Оценка проводилась для реальных условий полета по данным термометрирования, проведенного при испытаниях самолета.

Анализ нестационарных тепловых режимов блока был проведен с использованием «метода конечных балансов», по сути являющимся модификацией «метода сеток», основные идеи которого изложены в ряде работ по вычислительной физике [1—3]. В качестве инструмента для анализа нестационарных тепловых режимов блоков РЭА «метод конечных балансов» отработан в [4].

Цель расчета состояла в оценке значений среднеинтегральной температуры составных частей блока, поэтому при моделировании блок рассматривался как система тел с сосредоточенными параметрами (с реальной для каждого тела теплоемкостью), соединенных между собой тепловыми проводимостями, определенными с учетом реальных теплофизических и геометрических характеристик тел, их взаимного расположения и кондуктивных связей через места контактов и креплений. Такая постановка задачи моделирования позволяет перейти от системы дифференциальных уравнений в частных производных к системе обыкновенных дифференциальных нелинейных неоднородных уравнений, которая решается в матричной форме.

При необходимости задача решается в итерационном циклическом режиме.

Следует отметить, что после определения среднеинтегральной температуры тел моделируемой системы можно любое из них, в свою очередь, рассмотреть как систему, состоящую из частей, и произвести моделирование на новом, более детализированном уровне. Как показала практика, попытка добиться в

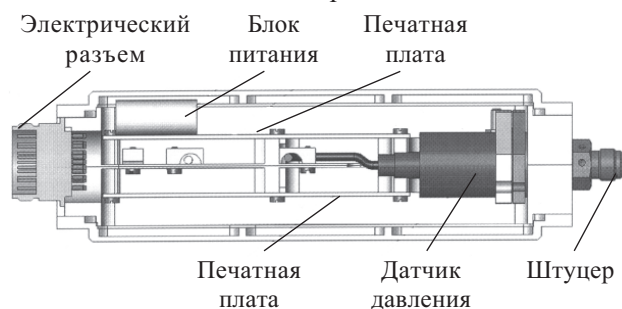
одной модели большой степени детализации приводит к вычислительным трудностям из-за большого числа уравнений и сложности эффективного анализа промежуточных результатов. Иерархическая процедура постепенной детализации гетерогенных структур (такowymi являются блоки РЭА) приводит к задаче анализа более гомогенных структур (плата, кристалл процессора), для анализа которых используют классический метод сеток.

В настоящей статье рассматривается первый уровень анализа блока.

### Моделирование тепловых режимов

При моделировании тепловых режимов использованы сведения о конструкции и расположении блока, краткое описание которых дано ниже.

Блок собран в герметизированном металлическом корпусе. Внутри корпуса (рис. 1) установлены две печатные платы, на которых расположены компоненты одного из каналов измерения давления: входные



усилители, аналого-цифровой преобразователь, микропроцессор, выходные формирователи и блок питания. К одной плате подключен канал датчика, измеряющего давление воздуха на входе в двигатель, к другой — измеряющего давление воздуха за компрессором высокого давления. Для крепления блока на двигателе в конструкции блока предусмотрен специальный экран с тросовыми амортизаторами. Тепловая схема расположения блока в подкапотном пространстве двигателя приведена на рис. 2.

Электротепловая схема блока, установленного в подкапотном пространстве, представлена на рис. 3.

Рассматриваемая система тел включает в себя следующие составляющие:

— экран, на котором через тросовые амортизаторы крепится блок;

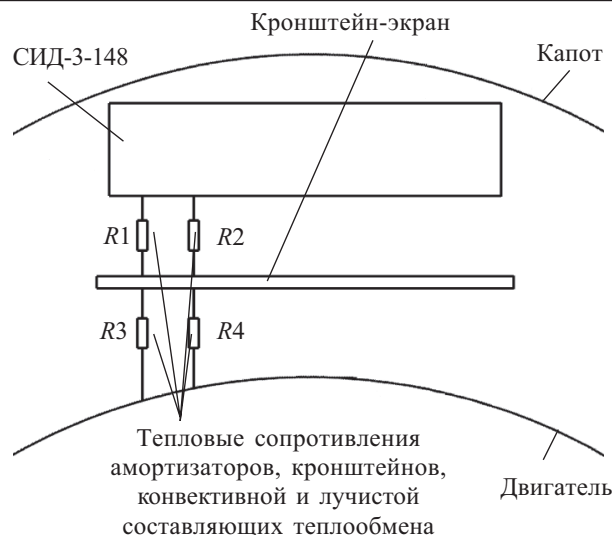


Рис. 2. Тепловая схема расположения блока в подкапотном пространстве двигателя

- корпус блока;
- воздух внутри блока;
- две печатные платы (нагретая зона).

При составлении модели рассматриваемой системы было принято допущение о том, что внешними границами системы являются воздух подкапотного пространства и оболочка двигателя. Их температуры изменяются по графику типового цикла самолета Ан-148, наиболее высокая температурная площадка графика это участок, соответствующий взлету и набору высоты до 10000 м.

Для отслеживания в процессе моделирования заданного графика изменения граничных температур, независимых от изменения температур экрана и корпуса блока, была разработана подпрограмма, обес-

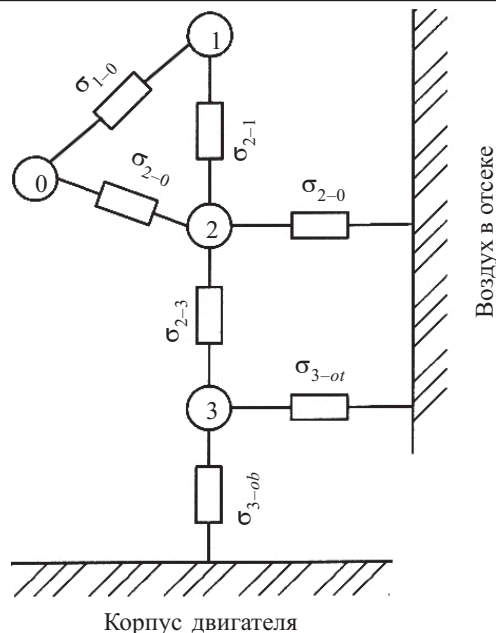


Рис. 3. Электротепловая схема блока, установленного в подкапотном пространстве:

- 0 — воздух внутри блока; 1 — нагретая зона (2 платы); 2 — корпус блока; 3 — экран; —  $\square$  — тепловые проводимости

печаивающая получение временной зависимости температуры границ рассматриваемой системы в подкапотном пространстве для трех температурных уровней площадки «взлет — набор высоты до 10000 м». Результаты моделирования представлены на рис. 4.

Профили температуры на всех трех уровнях подобны и эквидистантны. Обмен энергией указанных выше тел описывается нижеприведенной системой обыкновенных неоднородных нелинейных дифференциальных уравнений.

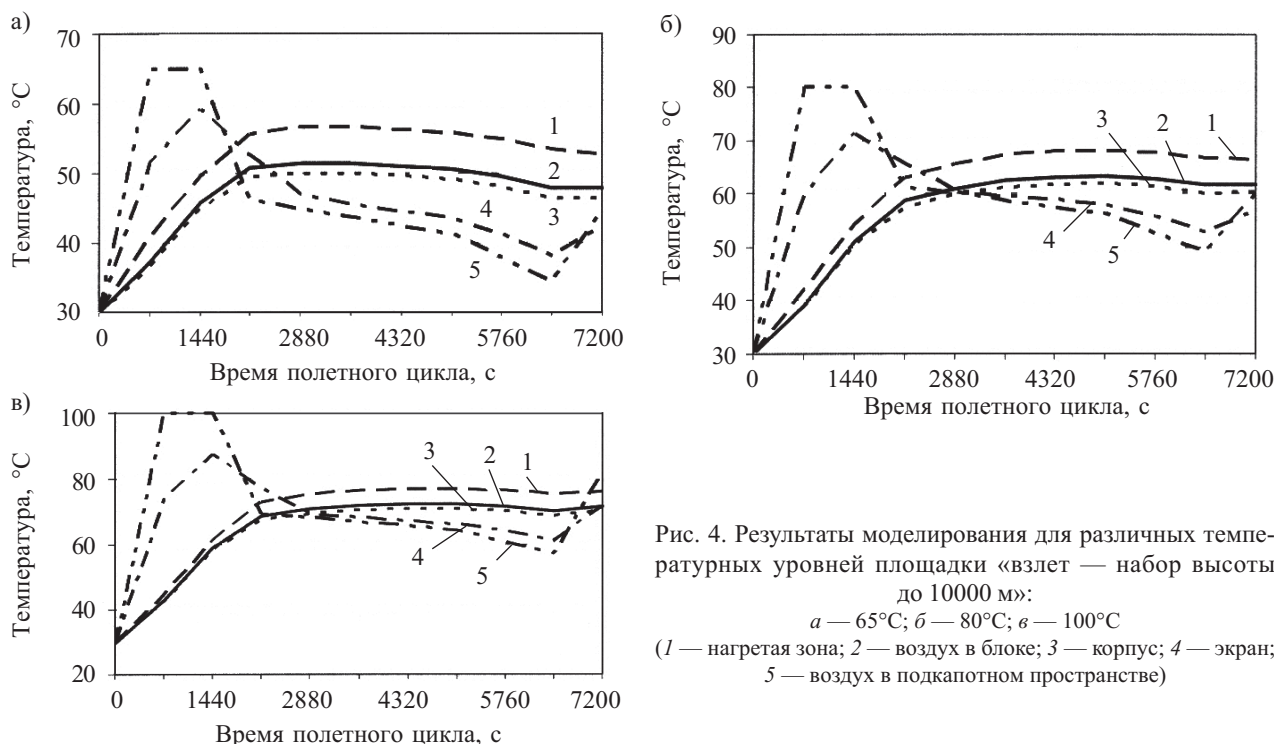


Рис. 4. Результаты моделирования для различных температурных уровней площадки «взлет — набор высоты до 10000 м»:

а — 65°C; б — 80°C; в — 100°C

- (1 — нагретая зона; 2 — воздух в блоке; 3 — корпус; 4 — экран; 5 — воздух в подкапотном пространстве)

$$\frac{d}{d\tau} t_0 = \frac{\sigma_{1-0}}{C_v} (t_1 - t_0) - \frac{\sigma_{2-0}}{C_v} (t_0 - t_2); \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau} t_1 = & \frac{-\sigma_{1-0}}{C_z} (t_1 - t_0) - \\ & - \frac{\sigma_{2-1} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(t_1 + 273)^4 - (t_2 + 273)^4}{t_1 - t_2} \varepsilon_{pr} \psi S_z}{C_z} \times \\ & \times (t_1 - t_2) + \frac{P_z}{C_z}; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau} t_2 = & \frac{\sigma_{2-0}}{C_k} (t_0 - t_2) + \\ & + \frac{\sigma_{2-1} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(t_1 + 273)^4 - (t_2 + 273)^4}{t_1 - t_2} \varepsilon_{pr} \psi S_z}{C_k} \times \\ & \times (t_1 - t_2) + \frac{\sigma_{2-3} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(t_3 + 273)^4 - (t_2 + 273)^4}{t_3 - t_2}}{C_k} \times \\ & \times (t_3 - t_2) + \frac{\sigma_{2-ot}}{C_k} (t_{vo}(\tau) - t_2); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau} t_3 = & \\ & = - \frac{\sigma_{2-3} + 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(t_3 + 273)^4 - (t_2 + 273)^4}{t_3 - t_2} \varepsilon_{pr} \psi S_{ek}}{C_{ek}} \times \\ & \times (t_3 - t_2) + \frac{\sigma_{3-ot}}{C_{ek}} (t_{vo}(\tau) - t_3) + \frac{\sigma_{3-ob}}{C_{ek}} (t_{kd}(\tau) - t_3), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\tau$  — время полетного цикла, с;  
 $t_0$  — температура воздуха внутри блока, °C;  
 $t_1$  — температура нагретой зоны блока, °C;  
 $t_2$  — температура корпуса блока, °C;  
 $t_3$  — температура экрана, °C;  
 $t_{vo}(\tau)$  — температура воздуха в отсеке, изменяющаяся во времени, °C;  
 $t_{kd}(\tau)$  — температура кожуха двигателя, изменяющаяся во времени, °C;  
 $C_v$  — теплоемкость воздуха в блоке, Дж/К;  
 $C_z$  — теплоемкость нагретой зоны блока, Дж/К;  
 $C_k$  — теплоемкость корпуса блока, Дж/К;  
 $C_{ek}$  — теплоемкость экрана, Дж/К;  
 $\sigma_{1-0}$  — тепловая проводимость между нагретой зоной и воздухом в блоке, Вт/К;  
 $\sigma_{2-0}$  — тепловая проводимость между корпусом блока и воздухом в блоке, Вт/К;  
 $\sigma_{2-1}$  — тепловая проводимость между корпусом блока и нагретой зоной, Вт/К;  
 $\sigma_{2-3}$  — тепловая проводимость между корпусом блока и экраном, Вт/К;  
 $\sigma_{2-ot}$  — тепловая проводимость между корпусом блока и воздухом в отсеке, Вт/К;  
 $\sigma_{3-ot}$  — тепловая проводимость между экраном и воздухом в отсеке, Вт/К;

$\sigma_{3-ob}$  — тепловая проводимость между экраном и оболочкой (кожухом) двигателя, Вт/К;  
 $\varepsilon_{pr}$  — приведенная степень черноты;  
 $\psi$  — средний угловой коэффициент;  
 $S_z$  — эффективная площадь излучения нагретой зоны, м²;  
 $S_{ek}$  — площадь поверхности экрана, м²;  
 $P_z$  — тепловая мощность, выделяемая элементами нагретой зоны, Вт.

В результате расчета получены следующие значения тепловых проводимостей между рассматриваемыми телами:

$$\begin{aligned} \sigma_{2-ot} &= 0,594; \sigma_{3-ob} = 0,540; \sigma_{3-ot} = 0,420; \sigma_{2-0} = 0,409; \\ \sigma_{2-1} &= 0,394; \sigma_{1-0} = 0,113; \sigma_{2-3} = 0,064. \end{aligned}$$

#### Анализ результатов моделирования и выводы

Анализ полученных в результате моделирования графиков позволяет сделать следующие выводы. Для рассмотренного низкотемпературного профиля изменения температуры воздуха в подкапотном пространстве (рис. 4, а) снижение температуры нагретой зоны могло бы достигаться за счет увеличения тепловой проводимости от нагретой зоны к воздуху в блоке и корпусу (возможно, путем введения дополнительных радиаторов повышенной степени черноты, теплоотводящих шин и др.). Для высокотемпературного профиля (рис. 4, в) было бы целесообразным уменьшать тепловую проводимость от воздуха в подкапотном пространстве к корпусу блока, что может быть реализовано посредством нанесения слоя высокоэффективного изолятора (например, термоизола) на наружную поверхность корпуса. Однако для того, чтобы выбрать один из указанных способов снижения температуры нагретой зоны, необходимо знать, какой режим превалирует в каждом конкретном случае.

Сопоставление приведенных тепловых проводимостей подтверждает рациональность выбора системы амортизации крепления блока: она не только поглощает динамические механические нагрузки, но и предохраняет блок от непосредственного теплового влияния двигателя.

Сопоставление графиков роста температуры воздуха в подкапотном пространстве, экрана и корпуса блока в первый высокотемпературный период (участок от 0 до 1440 с на рис. 4) позволяет сделать вывод о том, что отсутствие прямого лучистого теплообмена между корпусом блока и двигателем вследствие установки экрана снижает перегрев нагретой зоны и воздуха в блоке.

В целом, проведенная расчетная оценка условий работы радиоэлектронных компонентов в составе блока СИД-3-148 показала, что температура нагретой зоны блока при всех рассмотренных уровнях изменения температуры воздуха в подкапотном пространстве не достигает критических значений.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. — М.: Мир, 2001.
2. Федоренко Р. П. Введение в вычислительную физику. — М.: МФТИ, 1984.
3. Метьюз Д., Финк К. Численные методы. Использование MATLAB. — М.: Издательский дом «Вильямс», 2001.
4. Перепека В. И. Расчет стационарного режима теплонагруженных ЭРЭ в герметичном блоке // Тепловые режимы и охлаждение РЭА. — 2007. — № 1. — С. 44—49.