

УДК 621.44.016

Симбирский Д.Ф. – д-р техн. наук
 Макаренко Г.В. – канд. техн. наук
 Егорова И.В.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕРМО- НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОТУРБИ- НЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ И УСТАНОВОК

В практике испытаний, доводки и эксплуатации по техническому состоянию авиационных двигателей и других теплоэнергетических устройств применяются экспериментально-расчетные методы, в которых при обработке результатов непосредственных измерений используются математические модели имеющих место физических процессов, в частности, нестационарного тепло- и массопереноса. Эти методы позволяют устранить погрешности в непосредственно измеряемых температурах рабочего тела и поверхностей деталей, уровень которых в условиях современных высокотемпературных ГТД достигает 5...10 %, а также выполнять косвенные измерения тепловых величин (интеллектуальные измерительные приборы), не подлежащих непосредственным измерениям. К ним относятся теплофизические характеристики материала деталей, коэффициенты теплопередачи на поверхности и входящие в детали удельные тепловые потоки. Последние две категории представляют особое значение, так как используются в качестве граничных условий теплообмена (ГУ), информация о натуральных значениях которых обычно отличается значительной неопределенностью. Найденные таким образом ГУ используются в последующем в расчетах термонапряженного состояния деталей при их доводке, диагностике и оценках исчерпания ресурса в условиях реальной эксплуатации.

В 1994 году работа по созданию указанных методов основывалась на результатах предыдущих исследований и велась по следующим направлениям:

1. Совершенствование методов и средств получения исходной экспериментальной информации – высокотемпературных пленочных микротермопар (ВПТ) для термометрии рабочих и сопловых лопаток турбин, деталей камер сгорания и др. [1,2] и датчиков высоких (до 2000 К) температур газовых потоков на основе оригинальных редуцированных проточных термопреобразователей (РПТ) [3] .

2. Создание методов решения прямых и обратных задач тепло-

переноса (ПЗТ и ОЗТ) с целью определения указанных выше тепловых величин, методов планирования экспериментов для конкретных ОЗТ, а также программная реализация алгоритмов методов [1]

Разработка инженерных методов расчета надежности и ресурса деталей газотурбинных двигателей и установок по критериям длительной прочности и малоциклового усталости.

По первому направлению была предложена разновидность ВПТ для термометрии поверхностей деталей из тонкостенных сеточных (проницаемых) материалов класса жаростойких высокотемпературных хромо-никелевых сплавов. Указанные материалы предназначены, в частности, для разработки конструкций лопаток турбин с проницаемым охлаждением с температурами рабочего тела до 2000 К, что позволит создать ГТД и ГТУ нового поколения. Нами разработана технология нанесения ВПТ с платиновыми и платино-золото-палладиевыми термоэлектродами, препарирована серия моделей носовой части лопаток и успешно проведены их первичные испытания на стенде ИВТ РАН (Москва).

Разработана, изготовлена и успешно прошла испытания на высокотемпературном газодинамическом стенде ИПП НАНУ (Киев) упрощенная модификация РПТ – редуцированный датчик температуры (РДТ) для промышленных измерений температур газовых потоков до 2000 К. В РДТ используются обычные хромель-алюмелевые термопары взамен дефицитных и дорогостоящих платино-родиевых. По точности измерения РДТ существенно отличается в худшую сторону от РПТ, однако обладает такой же высокой стабильностью показаний и, благодаря оригинальному аналоговому электронному блоку, выдает восстановленное истинное значение температуры газа непосредственно на показывающий прибор системы управления и контроля стенда. Испытания показали его практически неограниченный ресурс и хорошие перспективы широкого промышленного использования.

По второму направлению исследований была предложена и программно реализована на ПЭВМ универсальная дифференциально-разностная модель одномерного нестационарного, нелинейного теплопереноса в телах типа полупространства, полубесконечной пластины конечной толщины, полого бесконечного цилиндра и др. с граничными условиями любого рода на ограничивающих поверхностях. Для получения такой модели одномерное тело необходимо разбить на N блоков, выбрать месторасположение характерных тем-

ператур блоков T_i ($i = 1, 2, \dots$) и составить для каждого блока уравнение теплового баланса (I). Обычно температуры внутренних блоков будем выбирать в их геометрических центрах, а температуры граничных блоков - на ограничивающих поверхностях (рис. 1).

Уравнение теплового баланса для i -го внутреннего блока запишется следующим образом

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{\lambda_{i-1,i} \cdot \delta_{i-1,i}}{(c\rho)_i \cdot F_i \cdot \Delta_{i-1,i}} T_{i-1} - \frac{1}{(c\rho)_i \cdot F_i} \left(\frac{\lambda_{i-1,i} \cdot \delta_{i-1,i}}{\Delta_{i-1,i}} + \frac{\lambda_{i,i+1} \cdot \delta_{i,i+1}}{\Delta_{i,i+1}} \right) \cdot T_i + \frac{1}{(c\rho)_i} \cdot \frac{\lambda_{i,i+1} \cdot \delta_{i,i+1}}{F_i \cdot \Delta_{i,i+1}} \cdot T_{i+1} \quad (I)$$

где t - время; $(c\rho)_i$ - удельные теплоемкость и плотность материала, отнесенные к температуре T_i ; $\lambda_{i,i+1}$ - теплопроводность, отнесенная к температуре $\frac{T_i + T_{i+1}}{2}$, $\Delta_{i,i+1}$ - расстояние между центрами блоков i и $i+1$; F_i - площадь i -го блока; $\delta_{i,i+1}$ - длина границы между блоками i и $i+1$.

Вид уравнения теплового баланса для граничных блоков зависит от рода граничных условий (ГУ). Для ГУ I-го рода - температур на поверхности - эти температуры входят в уравнение типа (I) для второго блока, то есть уравнений будет $N - 1$.

Для ГУ 3-го рода, задаются величины температуры среды T_{cp} и коэффициента теплоотдачи α на ограничивающей поверхности, уравнение для граничных блоков имеет вид:

$$\frac{dT_1}{dt} = - \frac{1}{(c\rho)_1 \cdot F_1} \left(\frac{\lambda_{1,2} \cdot \delta_{1,2}}{\Delta_{1,2}} + \alpha \cdot \delta_1 \right) T_1 + \frac{\lambda_{1,2} \cdot \delta_{1,2}}{(c\rho)_1 \cdot F_1 \cdot \Delta_{1,2}} T_2 + \frac{\delta_1}{(c\rho)_1 \cdot F_1} \alpha T_{cp} \quad (2)$$

Подобные уравнения можно записать для ГУ второго рода - тепловых потоков, входящих в тело и для ГУ с лучистым теплообменом.

Таким образом, из соответствующих уравнений для граничных блоков типа (2) и необходимого количества уравнений типа (I) для внутренних блоков можно составить систему из N , $N - 1$ или $N - 2$ уравнений, которая в векторно-матричном виде выглядит:

$$\vec{T}(t) = A \cdot \vec{T}(t) + G(t) \cdot \vec{u}(t) \quad (3)$$

где $\vec{T} = [T_i]_{i=1}^N$ - вектор состояния размерности $(N \times 1)$; A - $(N \times N)$ - матрица обратных связей; $G(t)$ и $U(t)$ - матрица управления и вектор управления соответственно, зависящие от вида граничных условий.

Уравнение (3), представляющее функционально-разностную модель одномерного теплопереноса, могут быть решено любым из известных методов (Рунге-Кутты, Хемминга и др.), имеющихся в программном обеспечении ПЭВМ. Для задач параметрической идентификации и оптимального управления процессом теплопереноса в реальном времени нами предложено использовать метод пространства состояний. В этом случае, принимая $\tau_k = k \cdot \Delta t$, имеем

$$\vec{T}_{k+1} = \Phi_{k+1,k} \vec{T}_k + \frac{1}{2}(I + \Phi_{k+1,k}) G_k \cdot \Delta t \quad (4)$$

где $\Phi_{k+1,k}$ - переходная матрица системы (3), $G_k = G(t_k)$,
 I - единичная матрица.

Переходная матрица $\Phi_{k+1,k}$ может определяться по формуле

$$\Phi_{k+1,k} = e^{A_k \Delta t} = I + A_k \Delta t + \frac{1}{2} A_k^2 \Delta t^2 + \frac{1}{3!} A_k^3 \Delta t^3 + \dots \quad (5)$$

где A_k - матрица обратных связей системы (3), в которой значения $(\varphi)_{i,i}$, $\lambda_{i-1,i}$, $\lambda_{i,i+1}$ отнесены к температурам $T_{i,k}$, $T_{i-1,k}$ и $T_{i+1,k}$, полученным на предыдущем расчетном шаге K .

В основу предложенной модели (3) нами был положен оригинальный алгоритм разбивки одномерного тела на блоки, позволяющий получать более детальное температурное поле для отдельных областей тела или "концентрировать" решение (рис. 1). Так, если на оси X установить положение ограничивающих поверхностей равными X_1 и X_N то в случае концентрации поля у точки X_1 для координат Z_i - правых границ i -х блоков будем иметь:

$$Z_i = X_1 + (X_N - X_1) \left(\frac{i}{N}\right)^k \quad (6)$$

При концентрации поля у точки X_N (рис. 2.б) получаем

$$Z_i = X_1 + (X_N - X_1) \cdot \frac{N^k - (N-i)^k}{N^k} \quad (7)$$

При необходимости сконцентрировать поле в точках X_1 и X_N одновременно (рис. 2.в) имеем

$$Z_i = X_1 + (X_0 - X_1) \left(\frac{i}{N_1}\right)^k + (X_N - X_0) \frac{N_2^k - (N_2 - i)^k}{N_2^k}, \quad (8)$$

где X_0 - граница между левым и правым участками концентрации.

Разбивка одномерного тела на блоки

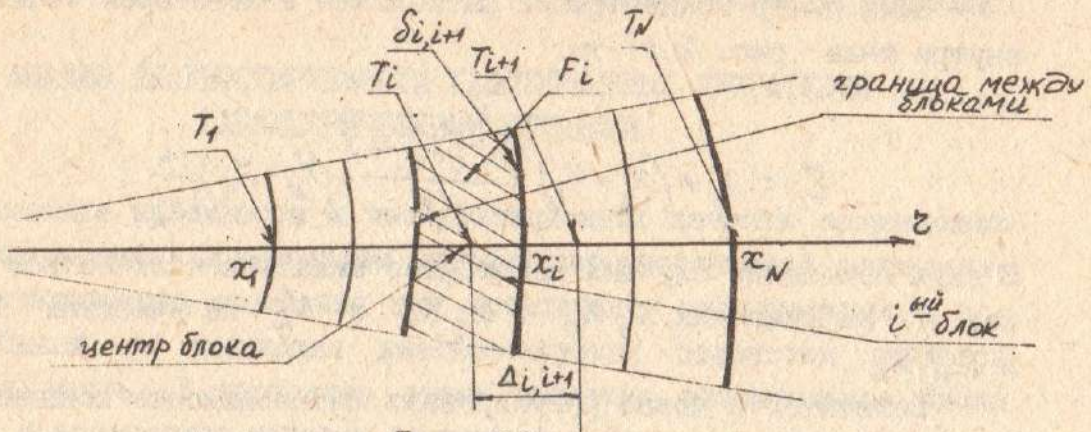


Рис. 1

Разбивка одномерного тела на блоки для различных вариантов концентрации поля

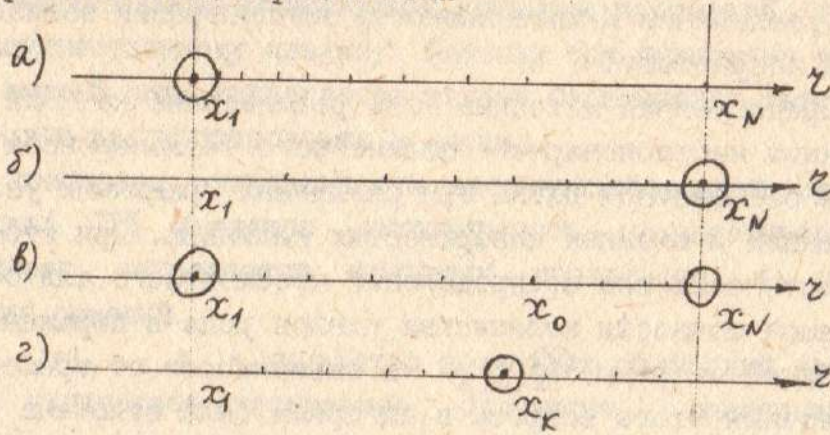


Рис. 2

Влияние величины K на неравномерность разбивки

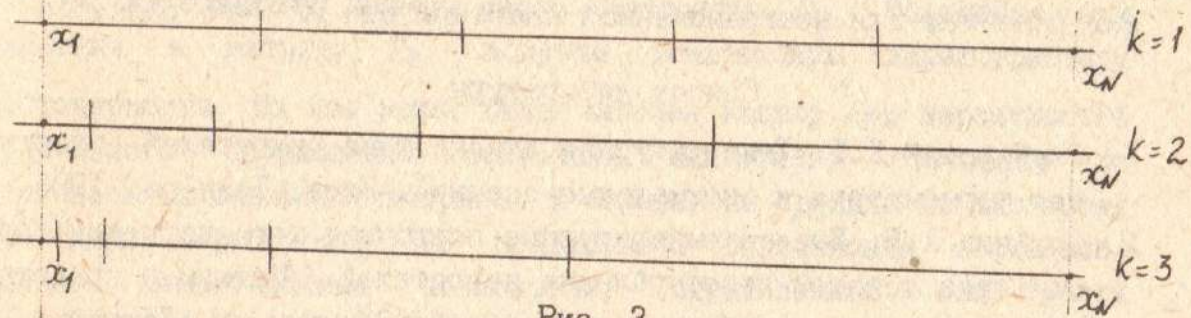


Рис. 3

Если центр концентрации расположен в некоторой точке X_k внутри тела (рис. 2.г) то:

$$Z_i = X_1 + (X_k - X_1) \frac{N_1^k - (N_1 - i)^k}{N_1^k} + (X_N - X_k) \left(\frac{i}{N_2} \right)^k \quad (9)$$

В двух последних случаях необходимо задаться количеством блоков N_1 на участках $X_1 X_0$ и $X_1 X_k$ и N_2 на участках $X_0 X_N$ и $X_k X_N$.

Величиной K можно регулировать интенсивность концентрации - степень неравномерности разбивки. Так, на рис. 3, для случая $N=5$ приведены различные варианты концентрации поля вблизи точки $X_1 = 0$. Очевидно, что при $K=1$ имеем равномерную разбивку, а при увеличении K интенсивность концентрации вблизи выбранного центра возрастает.

Предложенная методика была реализована на ПЭВМ РС при моделировании нестационарного нелинейного теплопереноса в полом цилиндре бесконечной длины при различных граничных условиях на внутренних и внешних поверхностях цилиндра. При этом основная трудность состояла в определении необходимого для обеспечения требуемой точности количества членов ряда в выражении (5) для переходной матрицы $\varphi_{k+1,k}$ в зависимости от временно шага Δt . Для решения этого вопроса в алгоритм была включена процедура автоматического выбора количества членов, исходя из задаваемых различий между $\varphi_{k+1,k}$ и $\varphi_{k+2,k+1}$.

Получено удовлетворительное согласование результатов, полученных при использовании описанного алгоритма, с аналитическим решением для неограниченной пластины при ГУ 3-го рода.

Список литературы

1. Симбирский Д.Ф. Температурная диагностика двигателей (пленочная термометрия и оптимальные оценки). - Киев; Техніка, 1986.
2. Олейник А.В. Высокотемпературные пленочные термопары для термометрии деталей газотурбинных двигателей // Методы и средства диагностики газотурбинных двигателей: Сб. науч. тр. - Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989. - С. 105-115.
3. Завалий А.А., Симбирский Г.Ф., Токарев Ю.Р. Адаптивный редуцированный проточный термопреобразователь для измерения высоких температур газовых потоков // Методы и средства диагностики газотурбинных двигателей: Сб. науч. тр. - Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989, - С. 105-115.