

УДК 621.3:536.24

## Алгоритм глобального теплового расчета систем терморегулирования космических аппаратов

Г. А. Иванова, А. С. Макарова, В. И. Завелион, О. Ю. Кострицын

Дніпропетровський державний університет

*Надійшла до редакції 28.12.96*

Запропоновано економний алгоритм теплового розрахунку для систем терморегулювання різної конфігурації з довільною кількістю структурних елементів.

### ПРИНЦИПЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ СИСТЕМ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Процесс теплопереноса в системах терморегулирования (СТР) космических аппаратов характеризуется относительно плавным изменением температуры по трактам контура. Для основных структурных элементов СТР, особенно для участков трубопроводов, оно довольно близко к линейному. Это позволяет при выделении расчетных элементов в системе терморегулирования для большинства из них принять, что элемент заключен между двумя узлами (узел на входе и узел на выходе). Такие элементы будем называть двухузловыми. К ним могут быть отнесены участки трубопроводов, теплообменники, приборы, нагреватели.

Исключение составляют элементы, в которых происходит слияние нескольких ветвей контура. К таким элементам относятся регуляторы расхода и расширительные емкости. Рассматривая их в качестве отдельных расчетных элементов, мы фактически применяем модель с сосредоточенными параметрами [1]. Кроме того, в отличие от двухузловых элементов эти «элементы-смесители» являются многоузловыми (число узлов равно общему количеству ветвей на входе и выходе из элемента). При выборе узлов для общего теплового расчета СТР будем руководствоваться следующим принципом:

каждый активно влияющий на тепловой баланс в системе структурный элемент должен быть «окружен» узлами. Для большинства СТР такими элементами будут приборы, теплообменники, нагреватели. При выделении расчетного элемента — участка трубопровода под длиной последнего будем понимать суммарную длину трубопроводов, на протяжении которой наблюдается незначительное изменение температуры. Для теплообменников, приборов, нагревателей характерно нелинейное изменение температуры по трактам проходящих через них трубопроводов. Следует, однако, отметить, что при глобальном тепловом расчете интерес представляет не сам закон распределения температуры по тракту, а ее абсолютное изменение между входом и выходом. Это позволяет рассматривать указанные структурные элементы и участки трубопроводов с единых позиций, варьируя лишь условия однозначности.

### РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ СТРУКТУРНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СТР

Температурное поле структурного элемента СТР, рассматриваемого как двухузловой расчетный элемент, описывается с помощью обобщенного уравнения теплопереноса [1]

$$\rho c_p F \frac{\partial T}{\partial t} = -G c_p \frac{\partial T}{\partial x} + k\Pi(T_{cp} - T), \quad (1)$$

где  $E(x)$ ,  $\Pi(x)$  — площадь и периметр поперечного сечения канала;  $k$  — коэффициент теплопередачи между жидкостью и окружающей средой с температурой  $T_{cp}$ ;  $G$ ,  $\rho$ ,  $c_p$  — массовый расход, плотность, теплоемкость жидкости.

Достаточная громоздкость СТР не всегда дает возможность провести внутреннюю дискретизацию каждого структурного элемента. Кроме того, наличие разветвлений не позволяет провести последовательную нумерацию узлов по тракту. Необходим ввод независимой системы нумерации узлов системы.

Исходя из вышеизложенного, примем, что любой двухузловой расчетный элемент с номером  $e$  заключен между узлами с некоторыми номерами  $i$  и  $j$ . Конечно-разностная аппроксимация уравнения (1) по неявной схеме запишется следующим образом:

$$\frac{T_j^n - T_i^{n-1}}{\tau} \rho c_p = -G c_p \frac{T_j^n - T_i^n}{L} + k\Pi(T_{cp}^n - T_i^n), \quad (2)$$

где  $L$  — суммарная длина тракта, приходящегося на данный элемент.

Разрешая (2) относительно  $T_j^n$ , получаем

$$T_j^n = A_{e_{ij}} T_i^n + B_{e_{ij}}, \quad (3)$$

где

$$A = \frac{\frac{G c_p}{L}}{\frac{\rho c_p F}{\tau} + \frac{G c_p}{L} + k\Pi}, \quad (4)$$

$$B = \frac{\frac{\rho c_p F}{\tau} T_i^{n-1} + k\Pi T_{cp}^n}{\frac{\rho c_p F}{\tau} + \frac{G c_p}{L} + k\Pi}.$$

Соотношение вида (3) является окончательным для последующего включения любого двухузлового элемента в общий алгоритм расчета. Идентификация каждого из элементов достигается при задании величин, входящих в это уравнение.

Для расчета многоузловых элементов воспользуемся известной формулой для определения температуры в смесителе. В наиболее простом случае для трехузлового элемента она имеет следующий вид:

$$T_k = \frac{G_{e_1} T_i + G_{e_j} T_j}{G_0}, \quad (5)$$

где  $T_k$  — результирующая температура,  $T_j$ ,  $T_i$  —

температуры смешивающихся потоков;  $G_{e_1}$ ,  $G_{e_j}$  — массовые расходы в элементах  $e_1$ ,  $e_j$ , находящихся на соединяющихся магистралях перед входом в смеситель,  $G_0 = G_{e_1} + G_{e_j}$  — общий массовый расход в контуре СТР.

В состав любой СТР входят конструктивные элементы, обеспечивающие заданный режим движения рабочей жидкости и при этом не оказывающие заметного влияния на изменение температуры теплоносителя. К таким элементам можно отнести блоки клапанов, а также различные местные сопротивления. В рамках единого подхода к дискретизации СТР, обеспечивающего возможность как гидравлического, так и теплового расчета, будем такие элементы при тепловом расчете рассматривать как фиктивные. Это означает, что температура теплоносителя в этих фиктивных элементах предполагается постоянной. Формальная реализация этого положения очень проста: в унифицированном соотношении (3) следует положить  $A = 1$ ,  $B = 0$ .

#### ПОСТРОЕНИЕ ОБЩЕГО АЛГОРИТМА ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА СТР

При построении алгоритма будем рассматривать СТР как объединение фрагментов с последовательным соединением двухузловых элементов, связь между фрагментами осуществляется через многоузловые элементы-смесители. Отметим, что прямое объединение уравнений вида (3) в систему не представляет особых сложностей, но в случае разветвленных СТР приводит к необходимости решения систем линейных уравнений очень большого порядка [1, 2]. Излагаемый ниже альтернативный подход лишен данного недостатка.

Применяя для последовательности двухузловых элементов, соединяющих, например, 1-й и  $j$ -й узлы, соотношение вида (3), получаем следующую рекуррентную формулу:

$$T_j = \alpha_{1,j} T_1 + \beta_{1,j}, \quad (6)$$

где

$$\alpha_{1,j} = A e_{1,j} \alpha_{1,1}, \quad (7)$$

$$\beta_{1,j} = A e_{1,j} \beta_{1,1} + B e_{1,j},$$

т. е. вычисляются через аналогичные соотношения для предыдущих элементов. Начальные значения коэффициентов  $\alpha_{1,1}$ ,  $\beta_{1,1}$  задаются с помощью очевидного тождества  $T_1 = T_1$ , откуда

$$\alpha_{1,1} = 1, \quad \beta_{1,1} = 0. \quad (8)$$

Построим аналогичную рекуррентную формулу

для структурных элементов, в которых происходит слияние различных ветвей СТР. После очевидных преобразований выражений (5) и (6) получим

$$T_k = \alpha_{1,k} T_1 + \beta_{1,k}, \quad (9)$$

где

$$\alpha_{1,k} = \frac{\alpha_{1,i} G_{e_i} + \alpha_{1,j} G_{e_j}}{G_0}, \quad (10)$$

$$\beta_{1,k} = \frac{\beta_{1,i} G_{e_i} + \beta_{1,j} G_{e_j}}{G_0}.$$

Таким образом, любой элемент может быть описан с помощью унифицированного соотношения вида (6).

Учитывая замкнутость контура СТР, для структурного элемента, соединяющего 1-й и  $N$ -й узлы, можно записать соотношение вида (6) с очевидным дополнением, откуда

$$T_1 = \frac{\beta_{1,N+1}}{1 - \alpha_{1,N+1}}. \quad (11)$$

Итак, алгоритм общего теплового расчета СТР произвольной конфигурации может быть сформулирован в виде следующей последовательности шагов.

1. Для всех структурных элементов системы, моделируемых двухузловыми элементами, вычисляются коэффициенты  $A$ ,  $B$ , зависящие только от типа элемента и входных параметров. Для многоузловых элементов они не вычисляются.

2. По рекуррентным формулам вида (7) для двухузловых и вида (10) для многоузловых элемен-

тов вычисляются коэффициенты  $\alpha_{1,j}$ ,  $\beta_{1,j}$  ( $j = 1, N$ ).

3. По формуле (11) вычисляется значение температуры  $T_1$  в первом узле.

4. По рекуррентной формуле вида (6) вычисляются значения температуры в остальных расчетных точках ( $T_j$  при  $j = 2, N$ ).

Предложенный алгоритм является экономичным, поскольку не требует хранения полной матрицы коэффициентов разрешающей системы уравнений. Действия производятся только с ненулевыми элементами, за счет чего обеспечивается относительно малое время расчета даже для СТР, содержащих большое количество структурных элементов. Это позволяет использовать данный алгоритм в качестве инструмента для проведения широкого вычислительного эксперимента по отработке СТР для КА различного назначения.

1. Дульнев Г. Н., Парфенов В. Г., Сигалов А. В. Методы расчета теплового режима приборов. — М.: Радио и связь, 1990.—312 с.

2. Малоземов В. В. Тепловой режим космических аппаратов. — М.: Машиностроение, 1980.—367 с.

#### ALGORITHM FOR GLOBAL THERMAL CALCULATIONS OF TEMPERATURE CONTROL SYSTEMS IN SPACE VEHICLES

G. A. Ivanova, A. S. Makarova, V. I. Zavelion, and O. Yu. Kostritsyn

An efficient algorithm of thermal calculation is proposed for temperature control systems of different configurations with an arbitrary number of structural elements.