

УДК 621.3:536.24

Г. А. Иванова

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

АЛГОРИТМ ТЕПЛООВОГО РАСЧЕТА СИСТЕМ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ КЛА

Запропонований економічний алгоритм теплового розрахунку систем терморегулювання різної конфігурації з довільним числом структурних елементів.

Ключові слова: система терморегулювання КЛА, алгоритм теплового чисельного розрахунку.

Предложен экономичный алгоритм теплового расчета систем терморегулирования различной конфигурации с произвольным числом структурных элементов.

Ключевые слова: система терморегулирования КЛА, алгоритм теплового численного расчета.

An cost-effective calculation algorithm of the thermal systems thermal regulation of the various configurations with an arbitrary number of structural elements has been proposed.

Keywords: spacecraft thermal control system, the algorithm of the numerical heat calculation.

Процесс теплопереноса в системах терморегулирования (СТР) характеризуется плавным изменением температуры по трактам контура СТР. Для основных структурных элементов СТР, особенно для участков трубопроводов, оно довольно близко к линейному, что подтверждается результатами автономных тепловых расчетов элементов при достаточно подробной их дискретизации. Допущение о линейности изменения температуры 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 следует отнести участки трубопроводов, теплообменники, приборы, нагреватели. Исключение составляют элементы, в которых происходит слияние нескольких ветвей контура СТР. Такими элементами являются 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 узлов на входе и на выходе). При выборе узлов для общего теплового расчета СТР будем руко-

водствоваться 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. Поскольку изменение температуры по длине трубопроводов близко к линейному, при выделении расчетного элемента – участка трубопровода, предполагается, что этот участок может состоять из нескольких участков труб с поворотами. Однако основной параметр такого расчетного элемента – его длина, представляет собой суммарную длину составляющих элемент участков трубопроводов. Для теплообменников, приборов, нагревателей, вообще говоря, характерно нелинейное изменение температуры по тракту проходящих через них трубопроводов. Учитывая, однако, что при глобальном тепловом расчете ЖСТР интерес представляет не сам закон распределения температуры по тракту, а ее абсолютное изменение между входом и выходом; для данных элементов допустима такая же методика расчета, как и для трубопроводов с соответствующей корректировкой условий однозначности.

Температурное поле структурного элемента СТР, рассматриваемого как двухузловой расчетный элемент, описывается обобщенным уравнением теплопереноса:

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

где F и Π – площадь и периметр поперечного сечения канала; k – коэффициент теплопередачи между жидкостью и окружающей средой с температурой T_{cp} ; G – массовый расход теплоносителя; ρ , c_p – плотность и теплоемкость жидкости.

Определив известным образом F и Π , можно использовать уравнение (1) для расчета трубопровода. Для этого заменим исходное дифференциальное уравнение конечноразностным аналогом. При этом будем руководствоваться следующими соображениями:

1. Достаточная громоздкость СТР не позволяет нам провести внутреннюю дискретизацию каждого структурного элемента. С физической точки зрения это оправдано тем, что, как показывает практика, изменение температуры по трактам СТР происходит достаточно плавно и поэтому может рассматриваться как линейное в пределах каждого структурного элемента системы.

2. При расчете всей СТР, содержащей разветвления, последовательная нумерация узлов по тракту реализована быть не может, что требует ввода при дискретизации совершенно независимой нумерации расчетных узлов системы.

Исходя из вышеизложенного, будем считать, что любой двухузловой расчетный элемент заключен между двумя расчетными узлами на входе и выходе. Пусть эти узлы имеют номера i и j . Тогда конечноразностный аналог уравнения (1) принимает следующий вид:

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

где L – длина рассматриваемого участка трубопровода.

Разрешая (2) относительно T_j^n , получаем

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

где

$$A = \frac{\frac{G c_p}{L}}{\frac{\rho c_p F}{\tau} + \frac{G c_p}{L} + k\Pi};$$

$$B = \frac{\frac{\rho c_p F}{\tau} T_i^{n-1} + k\Pi T_{cp}^n}{\frac{\rho c_p F}{\tau} + \frac{G c_p}{L} + k\Pi}. \quad (4)$$

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

Построение соотношений для структурных элементов, в которых происходит слияние различных ветвей СТР, требует отдельного рассмотрения. Для расчета многоузловых элементов воспользуемся известной формулой для определения температуры в смесителе. В наиболее простом случае для трехузлового элемента она имеет следующий вид:

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

где T_k – результирующая температура; T_i, T_j – температуры смешивающихся потоков; G_{e_i}, G_{e_j} – массовые расходы в элементах e_i, e_j , находящихся на соединяющихся магистралях перед входом в смеситель; $G_0 = G_{e_i} + G_{e_j}$ – общий массовый расход.

Структурный состав любой системы терморегулирования характеризуется наличием элементов, обеспечивающих заданный режим движения рабочей жидкости и при этом не оказывающих заметного влияния на изменение температуры теплоносителя. К таким элементам СТР можно отнести блоки клапанов, а также различные местные сопротивления. При выработке единого подхода к

структурированию СТР, обеспечивающего возможность как гидравлического, так и теплового расчета, целесообразно такие элементы рассматривать с точки зрения теплового расчета как фиктивные. Это означает, что температура теплоносителя в этих “фиктивных” элементах предполагается неизменной. Формальная реализация этого положения очень проста: в унифицированном выражении (3) следует положить $A=1$, $B=0$. В остальном процедура включения этих элементов в общий алгоритм теплового расчета та же, что и, например, для участка трубопровода.

При построении алгоритма будем рассматривать СТР как объединение фрагментов с последовательным соединением двухузловых элементов, связь между которыми осуществляется через многоузловые элементы - смесители. Отметим, что прямое объединение в систему уравнений вида (3) не представляет сложности, но приводит в случае моделирования разветвленных СТР 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 СТР, соотношение вида (3), получаем следующую рекуррентную формулу:

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

где

$$\begin{aligned} \alpha_{1,j} &= A_{e_{ij}} \alpha_{1,j}; \\ \beta_{1,j} &= A_{e_{ij}} \beta_{1,j} + B_{e_{ij}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Очевидно, что для организации последовательных вычислений по формулам (6), (7) все величины, входящие в их правые части, должны быть предварительно вычислены. Для начала вычислений коэффициентов $\alpha_{1,j}$, $\beta_{1,j}$ нужно задаться очевидным тождеством:

$$T_1 = T_1 \text{ или } T_1 = \alpha_{1,1} + \beta_{1,1},$$

откуда

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

Построим аналогичную рекуррентную формулу для структурных элементов, в которых происходит слияние различных ветвей СТР. Подставляя в (5) вместо T_i и T_j их выражения через формулу (6), получаем

$$T_k = \frac{G_{e_i} (\alpha_{1,i} T_i + \beta_{1,i}) - G_{e_j} (\alpha_{1,j} T_j + \beta_{1,j})}{G_0},$$

или после очевидных преобразований

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

где

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

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

Полученные соотношения наглядно показывают, что любой структурный элемент СТР может быть смоделирован с помощью унифицированного соотношения типа (6), изменяются лишь формулы для коэффициентов $\alpha_{1,k}$, $\beta_{1,k}$.

Учитывая замкнутость контура СТР, для структурного элемента с номером e_{N_1} , соединяющего последний (N -й) и 1-й узлы, можно записать соотношение вида (6) с очевидным дополнением:

$$T_{N+1} = T_1 = \alpha_{1,N+1}T_1 + \beta_{1,N+1},$$

откуда

$$T_1 = \frac{\beta_{1,N+1}}{1 - \alpha_{1,N+1}}.$$

Учитывая то, что коэффициенты $\alpha_{1,1}$, $\beta_{1,1}$ из (8) используются только в начале вычислений, при программировании данного алгоритма имеет смысл значения коэффициентов $\alpha_{1,N+1}$, $\beta_{1,N+1}$ поместить в ячейки для $\alpha_{1,1}$, $\beta_{1,1}$. Тогда окончательное выражение для T_1 примет вид

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

Итак, алгоритм общего теплового расчета ЖСТР может быть сформулирован в виде следующей последовательности шагов:

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

2. По рекуррентним формулам (7) для двухузловых и вида (10) для многоузловых элементов вычисляются коэффициенты $\alpha_{1,j}$, $\beta_{i,j}$ ($j = 1, N$).

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

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

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

Библиографические ссылки

1. Дульнев Г. П. Методы расчета теплового режима приборов / Г. П. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.
2. Малоземов В. В. Тепловой режим космических аппаратов / В. В. Малоземов. – М.: Машиностроение, 1980. – 380 с.

Надійшла до редколегії 29.03.2013

УДК 624.074.43: 658.512.011.56(075.8)

Т. В. Куш

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІСТЬ ПАЛИВНИХ БАКІВ

Як цільова функція проектування використовується мінімум стартової маси. Одним із факторів, що впливають на кінцеву масу конструкції, є суміщення функцій кількох конструкцій в одній, або збільшення їхньої функціональності. Значна частина загальної маси конструкції припадає на паливні баки, а тому збільшення їхнього функціонального навантаження дозволяє зменшити стартову масу загалом.

Варіантом збільшення функціональності паливних баків може бути відмова від хвостового та перехідного відсіків з наданням їхніх функцій паливним бакам. Для об-