

Математическое моделирование температурного состояния элементов конструкции трубчатого теплообменника дискового излучателя

Д-р техн. наук И. В. СТАНКЕВИЧ, А. А. ПОПКОВ-МЕЛЕНТЬЕВ

The paper considers peculiarities of mathematical modeling of the temperature state of a disk radiating device tubular heat exchanger structure elements during its operation in the space conditions. The solution of non-linear three-dimensional stationary problem of heat transfer under the conditions of constant thermophysical characteristics has been formulated and derived. The authors have developed a technique for numerical solution of a three-dimensional temperature problem for the element of structure of disk radiating device heat exchanger, based in the outer space, on which the algorithm of solution has been derived and a complex of software package has been developed. The numerical investigation of the temperature state of the element of structure of a disc radiator heat exchanger has been carried out. A comparative analysis of the temperature state for different operational conditions has been carried out.

Возможным вариантом охлаждающего устройства рабочего тела энергетической установки космического аппарата является дисковый излучатель [6, 7], состоящий из двух основных элементов (рис. 1): диска 1 и трубчатого теплообменника 4. Стенки теплообменника имеют разную по поверхности температуру и излучают полученное от теплоносителя тепло в окружающее пространство. Двигаясь в зазоре между стенками теплообменника, участок поверхности тонкого вращающегося диска нагревается, а затем, выйдя из зазора, также излучает тепло в окружающее пространство (космос). Такой излучатель имеет большую площадь теплоотдающей поверхности, а следовательно, при заданных температуре теплоносителя и внешних условиях излучает значительную удельную тепловую мощность [7].

Исследуемый вариант теплообменника выполнен в виде

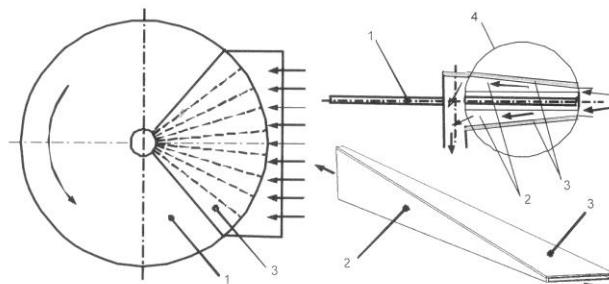


Рис. 1. Дисковый излучатель:

1 – диск; 2 – трубы с теплоносителем;

3 – противометеорная защита; 4 – теплообменник.

Стрелками указано направление течения теплоносителя и вращения диска

набора спаянных между собой медных трубок с переменным по длине прямоугольным профилем. Теплообменник усилен наружной стенкой из стали, выполняющей роль противометеорной защиты и имеющей идеальный тепловой контакт с теплообменником. Объектом исследования температурного состояния является трубка 2(см. рис. 1) с противометеорной защитой 3 и текущим по ней теплоносителем (жидким натрием [1]).

Площадь поперечного сечения в такой трубке меняется по длине канала, что приводит к изменению скорости течения теплоносителя вдоль канала (рис. 2, а, б).

Математическая постановка задачи

Искомое распределение температуры удовлетворяет двум уравнениям:

$$\Delta T = 0; \quad (1)$$

$$a \Delta T - \vec{v} \operatorname{grad} T = 0, \quad (2)$$

первое из которых относится к корпусу трубы теплообменника и пластине противометеорной защиты, а второе – к теплоносителю, движущемуся со скоростью v внутри трубы теплообменника; здесь a – коэффициент температуропроводности теплоносителя.

В качестве граничных условий приняты следующие. На торцевых поверхностях S_1 и S_2 (рис. 3) заданы граничные условия 1-го рода:

$$T|_{S_1} = T_1, T|_{S_2} = T_2, \quad (3)$$

Боковые поверхности S_3 и S_4 считаются теплоизолированными: (2)

$$\frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{S_3} = \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{S_4} = 0. \quad (4)$$

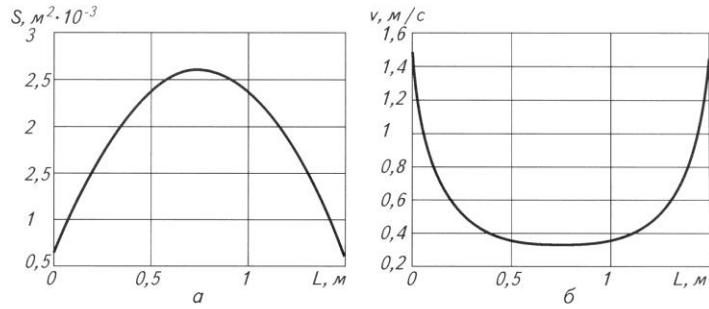


Рис. 2. Характеристики теплообменной трубы:
а – изменение площади сечения по длине канала;
б – изменение скорости течения теплоносителя по длине канала

На верхней поверхности пластины противометеорной защиты S_6 и на нижней поверхности трубы теплообменника S_5 заданы условия лучистого теплообмена:

$$\begin{aligned} \lambda_1 \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{S_5} &= -\varepsilon_1 \sigma_0 T^4 \Big|_{S_5}; \\ \lambda_2 \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{S_6} &= -\varepsilon_2 \sigma_0 T^4 \Big|_{S_6}. \end{aligned} \quad (5)$$

Совокупность уравнений (1), (2) и граничных условий (3) – (5) составляет дифференциальную постановку краевой нелинейной задачи стационарной теплопроводности.

Построение матричных соотношений МКЭ

В качестве рабочего инструмента был выбран метод конечных элементов (МКЭ), являющийся весьма удобным для решения задач теплопроводности. Рассматриваемая задача является нелинейной. Для ее решения используется метод последовательных итераций. Представим граничные условия, описывающие излучение, следующим образом:

$$\begin{aligned} q &= -5,67 \varepsilon [(0,01 T_{ct})^4 - (0,01 T_{cp})^4] = \\ &= -5,67 \cdot 10^{-8} \varepsilon (T_{ct}^4 - T_{cp}^4), \end{aligned}$$

где T_{ct} и T_{cp} – температуры соответственно стенки излучателя и внешней среды, К.

Далее преобразуем разность степеней температур в последнем выражении:

$$\begin{aligned} (T_{ct}^4 - T_{cp}^4) &= (T_{ct}^2 - T_{cp}^2)(T_{ct}^2 + T_{cp}^2) = \\ &= (T_{ct} - T_{cp})(T_{ct} + T_{cp})(T_{ct}^2 + T_{cp}^2) \end{aligned}$$

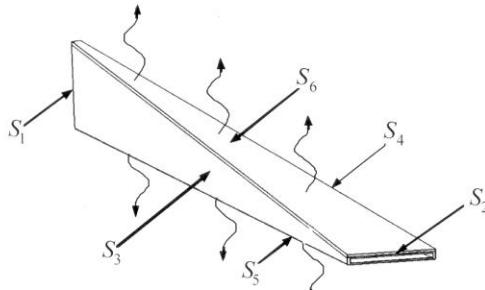


Рис. 3. К определению граничных условий

и обозначим $C = (T_{ct} + T_{cp})(T_{ct}^2 + T_{cp}^2)$. В результате получим

$$q = -\varepsilon \sigma_0 C (T_{ct} - T_{cp}). \quad (6)$$

Зафиксируем температуру стенки, входящую в величину C . Тогда лучистый поток, определяемый соотношением (6), становится линейной функцией. В дальнейшем после выполнения всех предусмотренных конечно-элементной технологией процедур и определения искомых температур выполняется коррекция величины C . Такая процедура повторяется до получения сходимости.

Матричные соотношения МКЭ строятся на основании эквивалентной вариационной формулировки [2, 8], которая применительно к задаче (1) – (5) предусматривает минимизацию функционала:

$$\begin{aligned} J[T] = &\int_V [0,5 \lambda (\nabla T)^2 - \vec{v}(\text{grad } T)T] dV + \\ &+ 0,5 \varepsilon_1 \sigma_0 \int_{S_5} CT^2 dS + 0,5 \varepsilon_2 \sigma_0 \int_{S_6} CT^2 dS. \end{aligned} \quad (7)$$

Минимизация $J[T]$ требует выполнения соотношения

$$\frac{\partial J[T]}{\partial \{T\}} = \frac{\partial}{\partial \{T\}} \sum_{e=1}^E J_e[\{T\}] = \sum_{e=1}^E \frac{\partial J_e[\{T\}]}{\partial \{T\}} = \{0\},$$

где $\{T\}$ – глобальный вектор узловых температур.

Окончательная система уравнений имеет вид

$$[K]\{T\} = \{F\}, \quad (9)$$

где

$$[K] = \sum_{e=1}^E [a^{(e)}]^T [k^{(e)}] [a^{(e)}]; \quad (10)$$

$$\begin{aligned} [k^{(e)}] = &\int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] dV + \\ &+ \varepsilon_1 \sigma_0 \int_{S_5^{(e)}} C [N^{(e)}]^T [N^{(e)}] dS + \varepsilon_2 \sigma_0 \int_{S_6^{(e)}} C [N^{(e)}]^T [N^{(e)}] dS; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\{F\} = -\sum_{e=1}^E [a^{(e)}] \{f^{(e)}\}; \quad (12)$$

$$\{f^{(e)}\} = -\int_{V^{(e)}} (C [B^{(e)}]^T [v^{(e)}]^T dV, \quad (13)$$

где $C = C'$;
 $C = [N^{(e)}][a^{(e)}]\{\bar{T}\}$;
 $\{\bar{T}\}$ – глобальный вектор узловых температур, найденный на предыдущей итерации;

$[a^{(e)}]$ – матрица геометрических связей конечных элементов ($KЭ$).

Вектор $\{\bar{T}\}$ используется для коррекции величин C и C' .

Система линейных алгебраических уравнений (9) решалась методом сопряженных градиентов [8].

Наличие нелинейности (излучения) и движущейся среды (текущего по каналу теплоносителя) определяет организацию глобального итерационного процесса: расчет температурного состояния трубы с теплоносителем повторяется до выполнения условия

$$\max_i |T_i^{(k)} - T_i^{(k-1)}| < \varepsilon, \quad (14)$$

где $T_i^{(k)}$ и $T_i^{(k-1)}$ – компоненты глобального вектора найденных узловых значений температур соответственно на k и $k-1$ итерациях;
 i – глобальный номер узла в сетке $KЭ$ модели.

Результаты численного исследования температурного состояния

Теплообменник был разбит на 525 конечных элементов (2800 узлов). В качестве конечных элементов были выбраны изопараметрические элементы высокого порядка – квадратичные двадцатиузловые $KЭ$ [6, 8].

Последовательное изменение распределения температуры ядра потока теплоносителя вдоль канала при скорости течения на входе в канал 1,5 м/с показано на рис. 4.

Жидкий натрий охлаждается с 973,15 К до 593,17 К, что составляет охлаждение на 379,98 К. Учитывая, что 593,17 К – это максимальное значение температуры ядра потока в сечении канала на выходе, то можно говорить о высокой степени эффективности отвода тепла рассматриваемым элементом конструкции теплообменника при данном режиме работы.

Как показали численные исследования, стальной лист противометеорной защиты, спаянный с трубками, улучшает условия нагрева усиленного таким образом теплообменника по сравнению с конструкцией, состоящей только из трубок. Это выражается в более низкой температуре той части потока теплоносителя, которая расположена ближе к стенке, спаянной со стальным листом, и в целом улучшает охлаждение.

Наряду с уже рассмотренным режимом работы температурное состояние конструкции было изучено при скоростях теплоносителя 0,1; 0,5 и 2 м/с, а также при скорости 5 м/с.

Установлено, что скорости течения теплоносителя в диапазоне 0,1...2 м/с не оказывают значительного влияния на температурное состояние рассматриваемого объекта: значения температуры охлажденного натрия отличаются лишь на 0,01...0,001 К. Однако стоит отметить, что среди минимально отличающихся друг от друга зна-

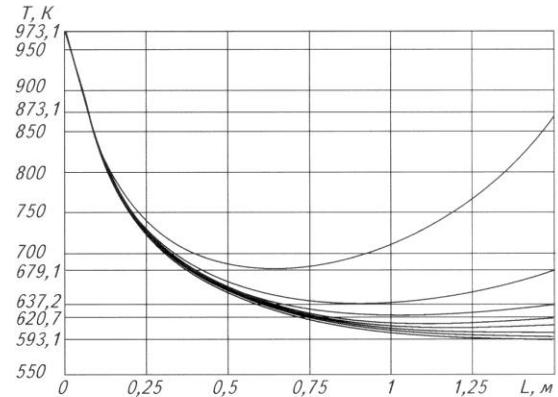


Рис. 4. Последовательное изменение распределения температуры ядра потока теплоносителя вдоль канала при скорости течения 1,5 м/с

чений температур наименьшее значение достигается при скорости 0,5 м/с. При скорости 5 м/с температура теплоносителя выше минимального значения всего на 0,1 К, но это – худший вариант охлаждения.

Выводы

Разработана методика математического моделирования температурного состояния элемента конструкции теплообменника дискового излучателя космического базирования, на основе которой построен численный алгоритм и создан комплекс прикладных программ.

Проведено численное исследование температурного состояния элемента конструкции теплообменника дискового излучателя, в рамках которого выполнен сравнительный численный анализ температурного состояния объекта исследования при разных режимах работы.

Список литературы

- Боришинский В.М., Кутателадзе С.С. Жидкometаллические теплоносители. – М.: Атомиздат, 1976.
- Зарубин В.С. Инженерные методы решения задач теплопроводности. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
- Зарубин В.С. Температурные поля в конструкции летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1966.
- Кошкин В.К., Калинин Э.К. Теплообменные аппараты и теплоносители. – М.: Машиностроение, 1971.
- Леонтьев А.И. Теория тепломассообмена. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997.
- Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979.
- Фаворский О.Н., Каданер Я.С. Вопросы теплообмена в космосе. – М.: Выш. школа, 1972.
- Шабров Н.Н. Метод конечных элементов в расчетах деталей тепловых двигателей. – Л.: Машиностроение, 1983.