

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА В СОТОВОЙ ПАНЕЛИ С ТЕПЛОВЫМИ ТРУБАМИ

Проведен анализ процессов теплообмена в сотовой панели и представлена нестационарная математическая модель для расчета температурных полей. Приведены некоторые результаты моделирования температурных режимов теплонагруженных сотопанелей.

Ключевые слова: сотовая панель, теплообмен, математическое моделирование.

В настоящее время в конструкции космических аппаратов (КА) все более широкое применение находят сотовые панели (СП), которые характеризуются высокой механической прочностью и очень малой плотностью. Сотовые панели используются как элементы конструкции КА: на них размещаются блоки радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), агрегаты и тепловые трубы (ТТ).

Для нормального функционирования РЭА необходимо поддерживать температурный режим, соответствующий техническим условиям эксплуатации. Однако малая объемная плотность конструкции СП определяет ее низкие теплопередающие свойства, что затрудняет эффективный отвод теплоты от блоков РЭА и обеспечение оптимальных тепловых режимов, а неоднородная структура СП усложняет расчет процессов теплообмена и анализ тепловых режимов РЭА.

При расчете тепловых режимов КА применяются различные математические модели. Наиболее распространенным подходом к описанию процессов теплообмена в КА является использование уравнения теплового баланса. Нестационарные тепловые математические модели, разработанные в рамках этого подхода, рассматриваются в монографии [1]. В работе [2] приведена математическая модель для расчета теплового режима прибора, расположенного на сотовой панели. В данной статье представлена математическая модель теплообмена в сотовой панели с тепловыми трубами, основанная на численном решении нестационарных уравнений теплопроводности с помощью конечно-разностной схемы расщепления по пространственным координатам. Высокая вычислительная эффективность метода конечных разностей позволяет повысить уровень детализации при расчете температурных полей. Представленная ниже математическая модель предназначена для расчета нестационарных тепловых режимов РЭА, оптимизации компоновки и параметров СП, количества и расположения ТТ.

Анализ процессов теплообмена. Сотовая панель состоит из двух параллельных пластин (обшивок 1 и 2), пространство между которыми заполнено сотами 3 из металлической фольги (сотопополнителем) (рис. 1). Вследствие малой объемной плотности сотопанели присуща низкая теплопередающая способность, поэтому для улучшения теплопередачи используют тепловые трубы, в которых высокая эффективная теплопроводность обеспечивается за счет циркуляции и фазовых превращений теплоносителя во внутреннем канале 4. Тепловые трубы расположены внутри СП и крепятся к обшивке с помощью посадочной площадки 5.

Теплообмен в сотовой панели существенно отличается от теплопередачи в сплошной металлической панели: во-первых, теплообмен в сотовой панели из-за наличия сотопополнителя и ТТ является явлением существенно трехмерным и анизотропным; во-вторых, теплопередача в сотовой панели может осуществляться как за счет механизма теплопроводности, так и посредством излучения.

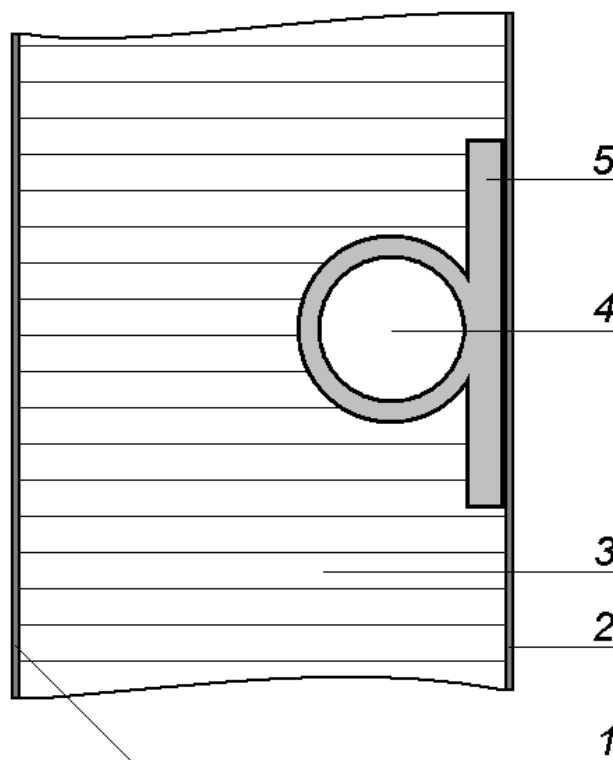


Рис. 1. Фрагмент сотопанели с тепловой трубой
(обозначения см. в тексте)

Для определения особенностей процесса оценим влияние механизмов теплообмена в объеме сотопанели. Как правило, плотность сотопополнителя примерно в 100 раз меньше плотности материала, из которого он изготовлен. Следовательно, эффективное значение коэффициента теплопроводности λ^* в поперечном направлении («обшивка 1–обшивка 2») будет составлять 0,01 от коэффициента теплопроводности сплошного материала. При величине теплового потока 400 Вт/м^2 и толщине сотопополнителя $d = 0,03 \text{ м}$ перепад температуры составит $\Delta T = qd / \lambda^* \approx 8 \text{ К}$. Плотность лучистого потока между обшивками 1 и 2 оценим по формуле $q_R = \varepsilon \sigma_{\text{сб}} (T_1^4 - T_2^4)$,

где σ_{SB} – постоянная Стефана–Больцмана. При значениях $\varepsilon = 0,2$, $T_1 = 308 \text{ К}$ и $T_2 = 300 \text{ К}$ величина $q_R \approx 1 \text{ Вт/м}^2$, что пренебрежимо мало по сравнению с рассматриваемой величиной теплового потока, переносимого теплопроводностью.

Малая толщина обшивок и низкая плотность сотонаполнителя обуславливает низкую теплопроводность сотонаполнителя и в продольных направлениях. В этом случае эффективный коэффициент теплопроводности будет примерно в 5–10 раз ниже, чем в обшивках, поэтому при проведении приближенных расчетов теплопередач в продольных направлениях можно пренебречь. При более точных расчетах продольную теплопроводность сотонаполнителя следует учитывать в виде добавки к теплопроводности обшивок, причем в общем случае эта добавка к коэффициенту теплопроводности из-за анизотропии сотонаполнителя зависит от направления. Сотонаполнитель имеет размеры пор порядка нескольких миллиметров, поэтому в представленной модели он рассматривается как сплошная среда, имеющая термическое сопротивление, определяемое параметрами сотонаполнителя.

Полученные оценки свидетельствуют о том, что в сотовых панелях теплопередача в продольных направлениях осуществляется в основном за счет теплопроводности обшивок, в поперечном направлении (между обшивками) – за счет теплопроводности материала сотонаполнителя. Сотовая панель в данном случае будем рассматривать как две плоские сплошные пластины, обменивающиеся между собой тепловой энергией через термическое сопротивление сотонаполнителя. При этом излучение учитывается только на внешней поверхности сотопанели при теплообмене с внешней средой.

Математическая постановка задачи и алгоритм численного решения. Для определения температурного режима сотовой панели математическая модель записывается в виде двух двумерных нестационарных уравнений с переменными коэффициентами, которые описывают распространение теплоты в обшивках

$$c_m(x, y) \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial T_i}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, y) \frac{\partial T_i}{\partial y} \right] + q_v(x, y, t) - \alpha_v(x, y, t) T_i, \quad (1)$$

где c_m – удельная объемная теплоемкость материала; T_i – температура; $i = 1, 2$ – индекс, соответствующий номеру обшивки; λ – коэффициент теплопроводности; t – время; x, y – пространственные координаты; q_v – объемная мощность источников и стоков теплоты; α_v – коэффициент теплообмена с внешней средой.

Уравнения (1) дополнены граничными условиями следующего вида:

$$\left[\lambda \frac{\partial T_i}{\partial l} + \alpha T_i \right]_{l=0, L} = q|_{l=0, L}, \quad l = x, y,$$

и начальным условием $T_i|_{t=0} = T_{i0}(x, y)$.

Величина теплового потока, перетекающего через сотонаполнитель с одной обшивки на другую, определяется выражением

$$q(x, y) = \frac{T_1(x, y) - T_2(x, y)}{R}, \quad (2)$$

где T_1 и T_2 – температуры обшивок 1 и 2 соответственно; R – удельное термическое сопротивление сотонаполнителя. Условие (2), описывающее теплообмен между обшивками, учитывается в уравнениях (1) с помощью двух последних слагаемых. Так, например, при расчете температурного поля первой обшивки в слагаемом объемного тепловыделения задается добавка $q_v(x, y) = T_2(x, y) / Rd_1$, а в коэффициент теплообмена – добавка $\alpha_v(x, y) = 1 / Rd_1$, где d_1 – толщина первой обшивки. Для второй обшивки используется аналогичное описание. Такой алгоритм расчета теплообмена между обшивками СП обеспечивает устойчивость вычислительного алгоритма. Кроме того, в слагаемое q_v входят тепловой поток от РЭА, внешние тепловые потоки и излучение с поверхности обшивок.

Тепловые трубы на обшивках СП в математической модели учитываются как зоны высокой однонаправленной теплопроводности, причем значение коэффициента теплопроводности, отвечающее за теплопередающую способность ТТ, задается для осевого направления. Теплопроводность посадочной площадки ТТ также должна учитываться, поскольку она может оказывать заметное влияние на теплопередачу в поперечном направлении.

При выборе численного метода решения задачи одними из самых важных критериев являются экономичность и устойчивость алгоритма. Кроме того, специфика задачи требует, чтобы вычислительный алгоритм позволял оперировать с однонаправленными компонентами коэффициента теплопроводности λ_x и λ_y , обусловленными анизотропией теплопроводности из-за наличия тепловых труб. Данным требованиям удовлетворяет метод суммарной аппроксимации [3], в котором используется расщепление задачи по пространственным координатам. При этом процесс решения нестационарной двумерной задачи на каждом временном шаге разбивается на два этапа, на каждом из которых решается локально-одномерная задача с помощью неявной разностной схемы.

При численном решении вводится сеточная функция $T_{n,m}^j$, соответствующая значениям температуры в узлах разностной координатной сетки при

$$x_n = (n-1)h_x, \quad y_m = (m-1)h_y, \quad t_j = (j-1)\tau$$

и промежуточная функция $U_{n,m}^j$.

На первом этапе решаются локально-одномерные задачи с компонентой коэффициента теплопроводности λ_x в направлении x для всех y_m и определяются значения промежуточной функции $U_{n,m}^j$

– для $n = 1$

$$U_{2,m}^j - \left(1 + \frac{\alpha_{0,x} h_x}{\lambda_{3/2,m}} + \frac{(c_v \rho)_{1,m} h_x^2}{2\lambda_{3/2,m} \tau} + \frac{\alpha_{V1,m} h_x^2}{4\lambda_{3/2,m}} \right) U_{1,m}^j + \frac{q_{0,x} h_x}{\lambda_{3/2,m}} + \frac{h_x^2}{2\lambda_{3/2,m}} \left(\frac{q_{V1,m}}{2} + \frac{(c_v \rho)_{1,m}}{\tau} T_{1,m}^{j-1} \right) = 0; \quad (3)$$

– для $n = 2, \dots, N-1$

$$U_{n+1,m}^j - \left(1 + \frac{\lambda_{n-1/2,m}}{\lambda_{n+1/2,m}} + \frac{(c_v \rho)_{n,m} h_x^2}{\lambda_{n+1/2,m} \tau} + \frac{\alpha_{Vn,m} h_x^2}{2\lambda_{n+1/2,m}} \right) U_{n,m}^j + \frac{\lambda_{n-1/2,m}}{\lambda_{n+1/2,m}} U_{n-1,m}^j + \frac{h_x^2}{\lambda_{n+1/2,m}} \left(\frac{q_{V1n,m}}{2} + \frac{(c_v \rho)_{n,m}}{\tau} T_{n,m}^{j-1} \right) = 0; \quad (4)$$

$$- \text{ для } n = N$$

$$- \left(1 + \frac{\alpha_{0,x} h_x}{\lambda_{N-1/2,m}} + \frac{(c_v \rho)_{N,m} h_x^2}{2\lambda_{N-1/2,m} \tau} + \frac{\alpha_{VN,m} h_x^2}{4\lambda_{N-1/2,m}} \right) U_{N,m}^j + U_{N-1,m}^j +$$

$$\frac{q_{L,x} h_x}{\lambda_{N-1/2,m}} + \frac{h_x^2}{2\lambda_{N-1/2,m}} \left(\frac{q_{VN,m}}{2} + \frac{(c_v \rho)_{N,m}}{\tau} T_{N,m}^{j-1} \right) = 0. \quad (5)$$

На втором этапе решаются аналогичные локально-одномерные задачи с компонентой коэффициента теплопроводности λ_y в направлении y для всех x и определяются значения сеточной функции $T_{n,m}^{j+1}$ на следующем временном шаге.

Алгебраические уравнения (3)–(5) решаются с помощью метода прогонки. Входными параметрами программы являются геометрические характеристики сотовой панели, теплофизические свойства материалов и параметры тепловыделения блоков.

Результаты расчетов. Выбор величины разностных шагов является важным моментом при проведении вычислений. Для получения адекватных расчетных результатов, исключающих существенное сглаживание температурных градиентов, величина шага не должна превышать характерного масштаба неоднородностей температурного поля. В данной задаче масштаб неоднородностей зависит от тепловых труб, поэтому поперечный размер ТТ, равный примерно 10 мм, определяет значение для разностных шагов по пространственным координатам $h_x = h_y = 10$ мм.

Особенности теплообмена в сотовой панели сначала исследуются на основе решения модельной задачи, в которой СП имеет следующие параметры: поперечные размеры СП 600×300 мм², толщина обшивок 0,4 мм, расстояние между обшивками 30 мм, удельное тепловое сопротивление сотозаполнителя $R = 10$ м/Вт. Вся внешняя обшивка панели является радиационной поверхностью, с которой испускается тепловой поток, соответствующий излучению в открытое космическое пространство с коэффициентом черноты поверхности $\varepsilon = 0,7$. На левой половине внутренней обшивки панели расположен прибор с размерами посадочного места 300×300 мм², мощность его тепловыделения 50 Вт, причем полагается, что тепловой поток от прибора распределен равномерно по всей площади посадочного места. Для улучшения теплопередачи на СП установлены две ТТ.

Моделирование проводилось для длительности процесса, соответствующей выходу на стационарный температурный режим. Результаты расчета, приведенные на рис. 2 и 3, где изолиниями и оттенками серого цвета изображены температурные поля внутренней и внешней обшивки СП, а температурный интервал между изолиниями равен 1 °С, показали, что на внутренней обшивке велика неоднородность распределения температуры (ее максимальный перепад составляет примерно 26 °С), связанная с низкой теплопередающей способностью обшивки в направлении, перпендикулярном ТТ. На внешней обшивке СП температурное поле является более сглаженным (здесь максимальный перепад температуры равен примерно 20 °С).

При значительной неоднородности распределений температуры гарантированно контролировать оптималь-

ный температурный режим РЭА достаточно сложно, поэтому для выравнивания теплового поля на обшивке СП дополнительно размещают термостабилизирующие пластины (ТСП), выполненные из металла с высоким коэффициентом теплопроводности. Причем температурные перепады уменьшаются пропорционально увеличению толщины ТСП. Например, использование алюминиевой пластины толщиной 6 мм позволяет уменьшить перепад температур до величины ≈ 2 °С. Однако увеличение толщины ТСП приводит к значительному росту веса конструкции. В перспективе для повышения теплопередающей способности вместо ТСП и ТТ можно рекомендовать гипертеплопроводящие пластины (ГТП). Расчет теплового режима СП с ГТП с толщиной 2 мм и значением эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эфф}} = 5000$ Вт/(м · К) дает практически однородное тепловое поле на внутренней обшивке (температурный перепад не превышает 0,5 °С), поскольку высокая теплопередающая способность ГТП эффективно сглаживает действие теплоты, поступающей от приборов и внешних тепловых потоков на радиационную поверхность.

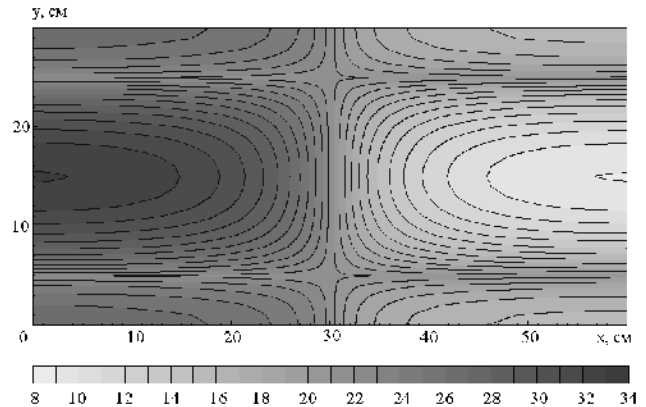


Рис. 2. Температурное поле внутренней поверхности СП (обозначения см. в тексте)

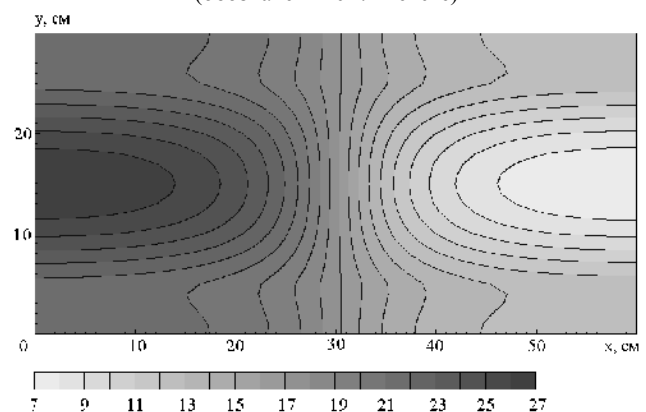


Рис. 3. Температурное поле внешней поверхности СП (обозначения см. в тексте)

В реальных конструкциях на сотовой панели может размещаться достаточно большое количество тепловыделяющих приборов и ТТ. Пример расчета температурных полей приведен на рис. 4, где показано распределение температуры на внутренней обшивке СП (границы посадочных мест приборов отмечены белым контуром). Температурное поле имеет неоднородную структуру и явля-

ется результатом совместного действия различных механизмов: тепловыделения приборов, теплопередачи по обшивкам и ТТ, теплообмена между обшивками СП и излучения с внешней обшивки.

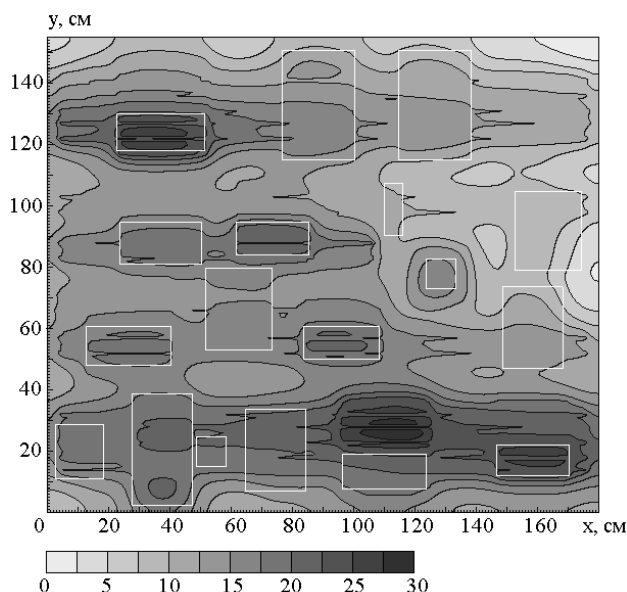


Рис. 4. Температурное поле внутренней поверхности теплонагруженной СП (обозначения см. в тексте)

Таким образом, использование математических моделей, по нашему мнению, наиболее актуально для расчета сложных конструкций СП, поскольку проведение вычислительных экспериментов позволяет получить полную и детальную информацию о тепловом режиме для различных внешних условий. Следует также отметить, что для проведения расчетов тепловых режимов СП сложной

конструкции необходим ввод значительного объема информации – как теплофизических характеристик, так и геометрических параметров конструкции (размеры, координаты посадочных мест приборов), масс и т. д., что может потребовать больших затрат времени. Ввод данных может быть существенно облегчен за счет непосредственного считывания информации из базы данных системы автоматизированного проектирования. Для реализации этого подхода на основе представленной математической модели разрабатывается программный комплекс для расчета тепловых режимов, который позволит существенно упростить процедуры ввода, редактирования, вывода и визуализации входных и расчетных данных.

Разработанная математическая модель позволяет проводить расчеты температурных полей обшивок сотовой панели с учетом детальной информации о конструкции сотопанели, мощностях тепловыделения РЭА и внешних тепловых условиях с целью обеспечения требуемых тепловых режимов функционирования РЭА.

Библиографические ссылки

1. Нестационарные тепловые режимы космических аппаратов спутниковых систем : монография / М. В. Краев, О. В. Загар, В. М. Краев, К. Ф. Голиковская ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2004.
2. Алексеев Н. Г., Загар О. В., Касьянов А. О. Система обеспечения теплового режима прибора с регулированием температуры в узком диапазоне // Решетневские чтения : материалы XI Междунар. науч. конф. Красноярск, 2007. С. 213.
3. Самарский А. А. Теория разностных схем. М. : Наука, 1989.

E. N. Vasilyev, V. V. Derevyanko

MATHEMATICAL MODEL OF HEAT EXCHANGE PROCESSES IN THE HONEYCOMB PANEL WITH HEAT PIPES

This article offers results of analysis of heat exchange processes in the honeycomb panel and presents a nonstationary model for calculation of temperature patterns. Some results of temperature modes modeling of intensive heat loaded honeycomb panels are given.

Keywords: honeycomb panel, heat exchange, mathematical modeling.

© Васильев Е. Н., Деревянко В. В., 2010