

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2008 г. В. Д. Мочалин

Государственный научно-исследовательский испытательный институт проблем технической защиты информации, г. Воронеж

Для моделирования тепловизионных изображений наземных объектов с внутренними источниками теплоты небольшой мощности и принудительной вентиляции отсеков, а также повышения точности моделирования при отсутствии внутренних тепловых источников предложено рассчитывать температурный режим объектов с учетом их теплового баланса с внешней средой. Показано, что в зависимости от состояния внешней среды температура воздуха внутри объекта без внутренних источников теплоты может быть как выше, так и ниже температуры атмосферы, существенно влияя в этих случаях на температурный контраст объектов с подстилающей поверхностью.

Коды OCIS: 000.6850, 110.6820.

Поступила в редакцию 18.05.2007.

Изображение наземного объекта в спектральных диапазонах 3–5 и 8–14 мкм может быть с достаточной для практики точностью сформировано при известном распределении термодинамической температуры по его поверхности [1–3]. Оценка температуры наземного объекта в общем случае предполагает решение нелинейных нестационарных краевых задач теплопроводности для тел сложной формы. Однако в связи со сложностью такого решения и отсутствием в большинстве случаев необходимых исходных данных в полном объеме для расчетов используют, как правило, упрощенную теплофизическую модель объекта, получающуюся в результате замены элементов его корпуса плоскими пластинами и понижения порядка дифференциального уравнения теплопроводности, используемого для определения их температуры [2, 3].

Уменьшение порядка дифференциальных уравнений возможно за счет различного рода допущений и ограничений. Например, в работе [2] для оценки температуры объекта используется решение стационарного уравнения теплопроводности второго порядка для плоской неограниченной пластины

$$T_i = \sqrt[4]{U_i^2 - U_i V_i + V_i^2} \sin(\varphi_i/2) - 0,5 \sqrt{U_i + V_i}, \quad (1)$$

где

$$U_i = \sqrt[3]{\gamma_i^2/2 + \sqrt{\gamma_i^4/4 + (4\tau_i/3)^3}},$$

$$V_i = \sqrt[3]{\gamma_i^2/2 - \sqrt{\gamma_i^4/4 + (4\tau_i/3)^3}},$$

$$\varphi = \arctg \left\{ \sqrt{3} (U_i - V_i) / (U_i + V_i) \right\}, \quad \gamma_i = \frac{\alpha + \alpha_{\text{вн}} (\alpha_{\text{вн}} R_i + 1)}{\varepsilon_i \sigma},$$

$$\tau_i = \frac{\alpha T_a + (1 - A_i) E_{\text{ic}} + \varepsilon E_{\text{ia}} + \alpha_{\text{вн}} T_{\text{вн}} (\alpha_{\text{вн}} R_i + 1)^{-1}}{\varepsilon_i \sigma},$$

$$R_i = \frac{d_i}{\lambda_i},$$

где $i = (1, n)$ – порядковый номер замещающей пластины, n – количество замещающих пластин, $\alpha, \alpha_{\text{вн}}$ – коэффициенты конвективного теплообмена на внешней и внутренней поверхностях пластины; ε_i, A_i – коэффициент излучения и альbedo внешней поверхности пластины; T_a – температура атмосферы, σ – постоянная Стефана–Больцмана, $E_{\text{ic}}, E_{\text{ia}}$ – облученность поверхности объекта солнечной радиацией и излучением атмосферы; $T_{\text{вн}}$ – температура воздуха внутри объекта, d_i, λ_i – толщина и коэффициент теплопроводности пластины.

Уменьшение порядка уравнения в данном случае было достигнуто пренебрежением тепловыми потоками в продольных направлениях, поскольку в большинстве случаев они возникают на краях пластин и не оказывают определяющего влияния на их температуру, а также исключением из рассмотрения теплоемкости замещающих пластин.

Последнее обусловлено тем, что для решения нестационарной задачи теплопроводности необходимо знание закономерностей изменения во времени параметров внешней среды (интенсивности солнечной радиации, температуры и собственного излучения атмосферы и подстилающей поверхности и т. д.). При этом температура пластины будет зависеть не только от значений параметров внешней среды в данный момент времени, но и от предыстории их изменения. Реально можно получить лишь приблизительную оценку указанных закономерностей, поэтому учет теплоемкости, существенно усложняя задачу теплопроводности, в этом случае не обеспечивает повышения достоверности результатов ее решения.

Уравнение (1) может использоваться для оценки температуры поверхности объектов, изготовленных с применением теплоизолирующих материалов. Для тонкостенных металлических объектов допустимо исключение из уравнения теплопроводности коэффициента теплопроводности λ , в результате чего оно преобразуется в дифференциальное уравнение теплового баланса с производной только по времени [3].

В обеих моделях учитывается конвективный теплообмен на внутренней стороне оболочки объекта. Его интенсивность зависит от температуры воздуха внутри объекта, которая определяется тепловым балансом объекта и внешней среды, а также наличием внутренних источников теплоты. Величину $T_{\text{вн}}$ можно считать известной только в случае искусственного поддержания внутри объекта постоянной температуры воздуха. В остальных случаях она неизвестна, поэтому на практике, как правило, ее приравнивают к температуре атмосферы, что может повлечь за собой существенное увеличение погрешности оценок.

В данной статье предложена стационарная теплофизическая модель наземного техногенного объекта, в которой температура воздуха определяется с учетом характеристик объекта и внешней среды, в том числе при наличии внутренних источников теплоты небольшой мощности и принудительной вентиляции. Возможность ограничения мощности внутренних источников обусловлена тем, что температурный режим объекта определяется в основном нагревом воздуха источниками небольшой мощности (отопители, радиотехническое оборудование и т. д.). Тепловые потоки от мощных источников, к которым относятся силовые и энергетические установки, подводятся к корпусу объектов всеми возможными способами: теплопроводностью, излучением и переносом тепла посредством воздуха. Кроме того, в отсеках с такими источниками, как правило, существует естественная вентиляция с неконтролируемой производительностью. В таких условиях теоретически оценить температуру воздуха внутри объекта с приемлемой точностью практически невозможно, а ее влияние на температуру поверхности объекта ограничено.

В предлагаемой теплофизической модели учитывается тепловой баланс с внешней средой не только отдельных элементов оболочки объекта (замещающих пластин), но и объекта в целом. Расширение системы уравнений за счет уравнения теплового баланса объекта обеспечивает возможность определения температуры воздуха внутри него. Оценка температуры внешней поверхности замещающих пластин T_i , $i = (1, n)$ и температуры воздуха $T_{\text{вн}}$ предполагает решение системы урав-

нений, состоящей из n стационарных уравнений теплопроводности [2]

$$d^2 T_i(x)/dx^2 = 0 \quad (2)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \lambda_i (dT_i/dx)_{x=0} &= \\ &= \alpha(T_i - T_a) + \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \varepsilon_i E_{ia} - (1 - A_i) E_{ic}, \quad (3) \\ \lambda_i (dT_i/dx)_{x=d} &= \alpha_{\text{вн}} (T_{\text{вн}} - T_{ix=d}) \end{aligned}$$

и уравнения теплового баланса объекта с внешней средой

$$\sum_{i=1}^n [\alpha(T_i - T_a) + \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \varepsilon_i E_{ia} - (1 - A_i) E_{ic}] \Delta S_i = 0, \quad (4)$$

где ΔS_i – площадь поверхности i -й замещающей пластины.

Поиск решения указанной системы уравнений в виде значений температуры поверхности замещающих пластин T_i , $i = (1, n)$ и температуры воздуха внутри объекта $T_{\text{вн}}$ может осуществляться посредством итерационной процедуры на основе вариации величины $T_{\text{вн}}$.

При наличии вентиляции часть воздуха из объекта выводится во внешнюю среду и такой же объем воздуха из нее вводится в объект. Количество теплоты $P_{\text{ф}}$, выводимое из объекта в единицу времени в результате такого теплообмена объекта с внешней средой, определяется выражением

$$P_{\text{ф}} = c_v (T_{\text{вн}} - T_a) N,$$

где c_v – теплоемкость воздуха, N – производительность вентиляционной установки (объем воздуха, выводимого из объекта в единицу времени).

При наличии внутренних источников теплоты теплоотдача объекта во внешнюю среду должна превышать поступление энергии из внешней среды в единицу времени на величину их мощности $P_{\text{и}}$. Тогда, с учетом вентиляции, уравнение теплового баланса (4) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n [\alpha(T_i - T_a) + \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \varepsilon_i E_{ia} - (1 - A_i) E_{ic}] \Delta S_i - \\ - P_{\text{и}} + c_v (T_{\text{вн}} - T_a) N = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для математического описания зависимости температуры поверхности замещающих пластин от температуры воздуха внутри объекта вместо уравнения теплопроводности (2) с граничными условиями (3) может использоваться формула (1), являющаяся его решением.

Влияние учета теплового баланса объекта на прогнозирование температуры его поверхности можно определить сравнением ее значений T_1 и T_2 , вычисленных по формуле (1) при условии $T_{\text{вн}} = T_a$

Теплофизическая модель объекта	Лето			Зима		
	Воздух внутри объекта	Верхняя поверхность	Боковая поверхность	Воздух внутри объекта	Верхняя поверхность	Боковая поверхность
Исходная (T_1 , К)	308	329,5	306	247	244	245
Усовершенствованная (T_2 , К)	318	333,5	309,5	243	242,3	243,4
Различие результатов расчёта ($T_1 - T_2$, К)	-10	-4	-3,5	4	1,7	1,6

и посредством решения системы уравнений (2)–(4) соответственно. Вследствие расчета температуры элементов поверхности объекта в обоих случаях по одному и тому же выражению (1) погрешности, обусловленные принятыми при его выводе допущениями и ограничениями, при сравнении в значительной степени компенсируются. Поэтому разность температур $T_1 - T_2$ фактически характеризует степень повышения точности теплофизической модели за счет ее совершенствования.

При проведении оценок рассматривался металлический объект контейнерного типа длиной 7 м, шириной 3 м и высотой 2 м. Корпус объекта алюминиевый ($\lambda = 209$ Вт/м К) толщиной $d = 0,005$ м со штатной окраской внешней поверхности (коэффициент излучения $\varepsilon = 0,8$ альбеда $A = 0,2$). К таким объектам можно отнести, например, грузовые или обитаемые отсеки некоторых транспортных средств, ангары и т. д. С целью упрощения расчетов предполагалось, что верхняя поверхность объекта перпендикулярна к направлению на солнце, а нижняя – теплоизолирована.

Выражение (1) при соблюдении равенства $T_{\text{вн}} = T_a$ не предназначено для оценки температуры объекта при наличии внутренних источников теплоты и вентиляции, поэтому величины T_1 и T_2 рассчитывались без учета этих факторов.

Оценка температурного режима объекта проводилась для параметров внешней среды, соответствующих летнему ($E_c = 900$ Вт/м², $T_a = 308$ К, температура подстилающей поверхности $T_\phi = 318$ К) и зимнему ($E_c = 0$, $T_a = 247$ К, $T_\phi = 243$ К) времени года при отсутствии облачности. Облученность E_a верхней поверхности объекта излучением атмосферы для указанных условий составляла в летнее время года 390 Вт/м², в зимнее – 170 Вт/м², облученность боковой поверхности излучением атмосферы и подстилающей поверхности 470 и 180 Вт/м² соответственно. Коэффициенты конвективного теплообмена на внешней и внутренней поверхностях оболочки объекта принимались равными $\alpha = \alpha_{\text{вн}} = 10$ Вт/м² К.

В летнее время года из-за нагрева воздуха внутри объекта под воздействием солнечной радиации можно ожидать максимального превышения величины $T_{\text{вн}}$ над температурой атмосферы, в зимнее в результате низкой интенсивности естественного теплообмена объекта с внешней средой – минимального отличия этих величин. Поэтому полученные в этих условиях значения разности температур $T_1 - T_2$ определяют диапазон ее изменения для исследуемого объекта при изменении состояния внешней среды.

Результаты прогнозирования параметров температурного режима объекта приведены в таблице.

Согласно данным таблицы полученная в результате решения системы уравнений (2)–(4) температура воздуха внутри объекта в летнее время при наличии солнечной радиации выше температуры атмосферы на 10 К, в зимнее время год – ниже температуры атмосферы на 4 К.

Соответственно изменяется и оценка температуры поверхности объекта, повышаясь для летнего времени года на 3,5–4 К и снижаясь для зимнего времени года на 1,6–1,7 К по сравнению с расчетами без учета теплового баланса объекта.

Несмотря на незначительное различие температур T_1 и T_2 , соответствующие им температурные контрасты исследуемого объекта с фоном $\Delta T_1 = T_1 - T_\phi$, $\Delta T_2 = T_2 - T_\phi$ различаются существенно. Например, в летнее время года относительное изменение контраста верхней поверхности объекта δ , рассчитанное по формуле $\delta = 100\%(\Delta T_1 - \Delta T_2)/\Delta T_1$, составляет около 35%.

Для объектов с внутренним источником теплоты различие температур T_1 и T_2 будет зависеть от мощности источника и может значительно превышать полученные данные.

Таким образом, учет теплового баланса наземных техногенных объектов с внешней средой при оценке температуры их поверхности обеспечивает возможность моделирования тепловизионных изображений наземных объектов с внутренними источниками теплоты небольшой мощности и принуди-

тельной вентиляцией отсеков, а также значительно повышает точность моделирования изображений при отсутствии внутренних тепловых источников.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Криксунов Л.З.* Справочник по основам инфракрасной техники. М.: Советское радио, 1978. 400 с.
 2. *Мочалин В.Д.* Прогнозирование радиационного контраста объектов в спектральных диапазонах 3,5–5 и 8–14 мкм // ОМП. 1991. № 6. С. 24–26.
 3. *Марков А.В., Остриков В.Н.* Моделирование инфракрасных изображений наземных объектов на основе термодинамического расчета // Оптический журнал. 2000. № 7. С. 100–105.
-