
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 536.6

Н. В. ПИЛИПЕНКО, Д. А. ГЛАДСКИХ

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрен перспективный нестационарный метод восстановления проходящих через ограждающие конструкции различных зданий и сооружений тепловых потоков на основе дифференциально-разностных моделей процесса теплопереноса.

Ключевые слова: тепловой поток, параметрическая идентификация, температура, дифференциально-разностная модель, ограждающие конструкции.

Введение. Проблема энергосбережения является важной частью социально-экономической политики государства. В 2009 г. был утвержден Федеральный закон № 261 „Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации“. Особое внимание в нем уделено энергетической эффективности зданий, строений, сооружений, поскольку значительная часть территории России находится за Полярным кругом, где отопительный сезон достигает 300 дней в году. Наиболее жесткие требования по эффективному использованию тепловой энергии предъявляются к жилым зданиям и сооружениям. Удельное энергопотребление жилых зданий в России (85 Вт·ч/м²·К·сут) существенно выше, чем в зарубежных странах (Швеция — 34, США — 44) [1].

Теплозащита отапливаемого здания является одним из важнейших эксплуатационных критериев оценки его качества, поскольку от этого показателя зависят благоприятный микроклимат зданий, тепловые потери в зимнее время, температура внутренней поверхности ограждения. Эта характеристика определяет расходы на отопление помещений и поддержание в них нормативного микроклимата.

Постановка задачи и метод решения. Одним из наиболее важных теплоэнергетических показателей зданий и сооружений является сопротивление теплопередаче элементов ограждающих конструкций (несущие стены, перекрытия, кровля, окна, двери и другие аналогичные конструктивные элементы зданий и сооружений), под которым обычно понимают сумму конвективных сопротивлений на наружной и внутренней поверхностях стен и суммарное кондуктивное сопротивление слоев ограждающей конструкции (ОК):

$$R = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}} + \sum_{i=1}^m \frac{h_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{нар}}}, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{вн}}$ и $\alpha_{\text{нар}}$ — коэффициенты теплоотдачи от воздуха к внутренней поверхности ОК и от наружной поверхности ОК к наружному воздуху, h_i и λ_i — толщина (м) и теплопро-

водность (Вт/м·К) i -го слоя. В уравнении (1) предполагается идеальный тепловой контакт между слоями ОК.

Как следует из литературы [2], вклад первого и последнего членов в правой части уравнения (1) в общее сопротивление незначителен и в зависимости от конструкции ОК не превышает 5 %.

Для качественной и, что важнее, количественной оценки величины тепловых потерь, возникающих при эксплуатации зданий и сооружений, необходимо определить тепловое сопротивление ОК. При этом принципиально возможно использовать два подхода: нестационарный и стационарный. Сильной стороной нестационарного подхода определения теплового сопротивления ОК является относительно малое время измерений, необходимое для расчетов (менее одного рабочего дня).

При стационарном подходе время измерений составляет 15 суток и более [3, 4]. Авторы на основе расчетно-экспериментальных исследований утверждают, что установившееся тепловое состояние ОК в зависимости от тепловой инерции достигается в течение 120—150 часов. При этом необходимо выполнять многократные измерения температурного напора $\Delta t(\tau)$ (разности температуры воздуха внутри и вне помещения).

Предложенный А. В. Шишкиным [1] подход заключается в решении в общем виде дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с начальными и граничными условиями с дальнейшей подстановкой результата в уравнение теплового баланса на поверхности теплообмена с атмосферой. Как утверждает автор, при этом подходе можно получить решение только для наружной поверхности ОК. Но приведенные в работе [1] формулы для расчета температуры и удельного теплового потока на наружной поверхности ОК громоздки и малоприспособны для использования. Однако подход, основанный на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопередачи, является перспективным. Применять его возможно практически в любое время года, в неотапливаемых помещениях, его реализация не требует продолжительного времени.

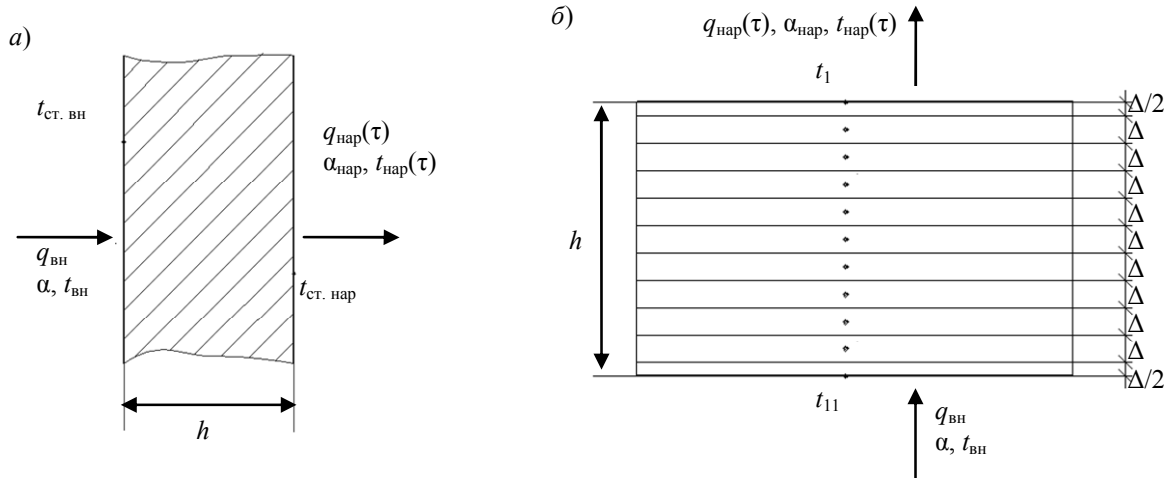
Представим метод решения задачи с помощью параметрической идентификации тепловых потоков и уточнения теплофизических свойств материалов ОК [5]. Поскольку системой теплоснабжения температура внутри помещения поддерживается практически постоянной, то на величину тепловых потерь существенно влияют коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности ОК и температура наружного воздуха. Термическое сопротивление ОК с изменением температуры внутренней поверхности стенки изменяется незначительно, поэтому, измерив температуру наружной поверхности ОК и рассчитав или измерив удельный тепловой поток через исследуемый участок ОК, можно вычислить термическое сопротивление рассматриваемого участка ОК.

Динамика одномерного теплопереноса в ОК может быть описана системой обыкновенных дифференциальных уравнений. Математические модели, в которых выполнена дискретизация пространства теплопереноса вдоль одной оси, а время считается непрерывным, принято называть дифференциально-разностными моделями (ДРМ) [6].

Предлагается использовать ДРМ в качестве основной универсальной модели теплопереноса в одномерных стенках ОК различных тепловых схем. В качестве примера рассмотрим однородную стенку, которая может быть представлена в виде теплоизолированной на боковой поверхности пластины толщиной $h = 0,2$ м с теплофизическими свойствами: $\lambda = 0,076$ Вт/м·К, $c\rho = 1,69 \cdot 10^5$ Дж/м³·К, где λ , c , ρ — теплопроводность, теплоемкость, плотность материала ОК. На рисунке приведены тепловая схема (а) и топология (б) ОК в виде пластины ($t_{ст.вн}$ и $t_{ст.нар}$ — температура внутренней и наружной стенки соответственно, q — тепловой поток).

Для построения ДРМ пластину по толщине h , разбиваем на n слоев (в данном случае $n = 11$) с температурой t_1, t_2, \dots, t_{11} . Средние значения температуры слоев, отнесенные к их

центрам, составляют вектор состояния пластины. При этом для расчетов толщину граничных слоев удобно установить как $\Delta/2$, а средние значения их температуры — t_1 и t_{11} — отнести к торцевым поверхностям.



Для каждого слоя составим уравнение теплового баланса между изменением его теплоемкости и потоками тепла от соседних слоев, а для граничных слоев — от внешней и внутренней среды при постоянных теплофизических характеристиках. Проведя преобразование уравнений, получим ДРМ в развернутой форме:

$$\begin{cases} \frac{dt_1}{d\tau} = -\frac{2a}{\Delta^2}t_1 + \frac{2a}{\Delta^2}t_2 - \frac{2q}{c\rho\Delta}, \\ \dots \\ \frac{dt_i}{d\tau} = \frac{a}{\Delta^2}t_{i-1} - \frac{2a}{\Delta^2}t_i - \frac{a}{\Delta^2}t_{i+1}, \\ \dots \\ \frac{dt_{11}}{d\tau} = \frac{2a}{\Delta^2}t_{10} - \left(\frac{2\alpha}{c\rho\Delta} + \frac{2a}{\Delta^2}\right)t_{11} + \frac{2\alpha}{c\rho\Delta}t_{cp}, \end{cases} \quad (2)$$

где $a = \lambda/c\rho$ — температуропроводность материала пластины.

Окончательно ДРМ (2) можно записать в векторно-матричной форме [3]:

$$\frac{d\mathbf{T}}{d\tau} = F\mathbf{T} + G\mathbf{U}, \quad (3)$$

где $\mathbf{T} = [t_1 \ t_2 \ \dots \ t_{11}]^T$ — (11×1) -вектор состояния, $\mathbf{U} = q(\tau)$ — (1×1) -вектор управления (входных воздействий), $G = \begin{bmatrix} -2 & 0 & 0 & \dots & 2\alpha \\ c_1\rho_1\Delta_1 & & & & c_3\rho_3\Delta_3 \end{bmatrix}^T$ — (11×1) -матрица управления. Матрица обратных связей F размерности (11×11) имеет обычную трехдиагональную форму.

Предложенный подход был использован при восстановлении плотности теплового потока по измеренным значениям температуры наружного воздуха для ряда зданий Вологодской области [1].

Заключение. Полученные в настоящей статье результаты хорошо совпадают с данными, приведенными в работе [1]. Изложенная методика прошла многократную апробацию как для восстановления тепловых потоков, так и для уточнения теплофизических свойств материалов ОК, и в настоящее время используется различными организациями [5].

В работе рассмотрен перспективный нестационарный метод восстановления тепловых потоков, проходящих через ОК различных зданий и сооружений, который позволяет проводить исследования в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишкин А. В. Разработка методики расчета теплового сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с использованием тепловизионной диагностики. Дис. ... канд. техн. наук. СПб, 2001.
2. ГОСТ 26254-84 Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций.
3. Пилипенко Н. В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотметрии. Ч. 1 // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 8. С. 50—54.
4. Пилипенко Н. В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотметрии. Ч. 2 // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 10. С. 67—71.
5. Пилипенко Н. В., Сиваков И. А. Метод определения нестационарных тепловых потоков и теплопроводности путем параметрической идентификации // Измерительная техника. 2011. № 3. С. 48—51.
6. Pilipenko N. Parametrical identification of differential-difference heat transfere models in non-stationary thermal measurements // Heat Transfer Research. 2008. Vol. 39, N 4. P. 311—315.

Сведения об авторах

- Николай Васильевич Пилипенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: pilipenko38@mail.ru
- Дмитрий Аркадьевич Гладских** — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: gladskih@gmail.com

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики
и энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию
14.04.11 г.