

К. С. КОСТЕНКО, Г. Н. ЛУКЪЯНОВ, Д. С. ПЕТРОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТЕПЛООБМЕНА ЧЕРЕЗ ОГРАЖДАЮЩУЮ КОНСТРУКЦИЮ

Рассмотрены особенности теплообмена через ограждающие конструкции зданий и сооружений в статическом и динамическом режимах. Приведены результаты экспериментов по измерению колебаний температуры вне и внутри здания и анализ их взаимосвязи.

Ключевые слова: ограждающая конструкция, теплообмен, тепловая инерция, спектральная плотность мощности, фазовый сдвиг.

Экспериментальное исследование теплообмена через ограждающую конструкцию (ОК) является основой для решения задач контроля качества тепловой изоляции и оценки тепловой эффективности зданий и сооружений.

Существующие методики оценки тепловой эффективности базируются на стационарных методах, основная суть которых состоит в следующем. Для рассматриваемой задачи тепловая схема процесса теплопередачи может быть представлена как одномерная задача теплопроводности через плоскую многослойную стену: схема процесса представлена на рис. 1, где Q — тепловой поток, проходящий через ограждающую конструкцию; T_1, T_2, \dots, T_n — температура на границе 1-го, 2-го, ..., n -го слоя ОК; $T_{\text{сп},2}$ — температура окружающей среды при различных погодных условиях; $T_{\text{вн.п}}$ — температура воздуха внутри помещения; $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ — толщина 1-го, 2-го, ..., n -го слоя ОК

Уравнение для определения теплового потока имеет следующий вид:

$$Q = \frac{T_1 - T_{n+1}}{\sum_{i=1}^n R_i} S,$$

где $\sum_{i=1}^n R_i = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ — суммарное термическое сопротивление n слоев ОК; S — площадь ОК;

δ_i, λ_i — толщина и коэффициент теплопроводности материала i -го слоя ОК соответственно.

Для расчетной схемы процесса теплопередачи (см. рис. 1) при установившемся тепловом режиме ОК тепловые потоки, проходящие через каждый из слоев конструкции, одинаковы. Термическое сопротивление и площадь ОК остаются неизменными, а тепловой поток поддерживается системой управления теплоснабжением здания на уровне, обеспечивающем нормативные параметры воздуха внутри помещения.

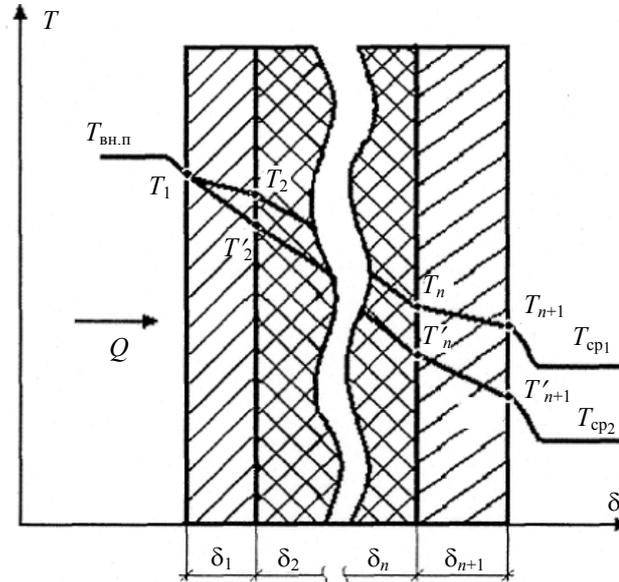


Рис. 1

Таким образом, переменными параметрами процесса теплопередачи для рассматриваемого случая являются разность температур вне и внутри помещения ($\Delta T = T_1 - T_{n+1} \neq \text{const}$) и находящийся в пропорциональной зависимости от нее тепловой поток через ОК ($Q \neq \text{const}$), а неизменным параметром является термическое сопротивление ОК. Тогда, определив удельный тепловой поток через ОК одним из инструментальных методов и используя уравнение теплопроводности

$$q = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\delta_i} (T_1 - T_{n+1}),$$

можно вычислить термическое сопротивление ОК:

$$R = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{\delta_i} = \frac{(T_1 - T_{n+1})}{q}.$$

Для получения достоверных результатов при контроле теплозащитных свойств ОК согласно нормативным документам требуется проведение измерений при режиме теплопередачи, близком к стационарному (в условиях отсутствия атмосферных осадков, тумана, задымленности и исключения воздействия на ОК в течение 12 ч до проведения измерений прямого и отраженного солнечного облучения). При этом предусматривается минимальная длительность периода наблюдения Z_0 (в сутках) за температурами воздуха вне и внутри помещения, которая определяется зависимостью [1]

$$Z_0 = \frac{Z_1 D^2}{2\pi},$$

где D — тепловая инерция ОК при периоде колебаний температуры воздуха, равном 24 ч.

По результатам натурных испытаний строятся графики изменения во времени температур и плотности тепловых потоков (рис. 2), по которым выбираются периоды с наиболее установившимся режимом и вычисляются средние значения термического сопротивления для данного периода; на рис. 2: a — изменения температуры воздуха внутри помещения

$T_{\text{вн.п}}$ (кривая 1) и температуры воздуха окружающей среды $T_{\text{ср}}$ (кривая 2); б — изменение температуры $T_{\text{ср}}$; в — изменение теплового потока через ОК; г — изменения $T_{\text{вн.п}}$ (кривая 1) и $T_{\text{ср}}$ (кривая 2) — нормированные значения.

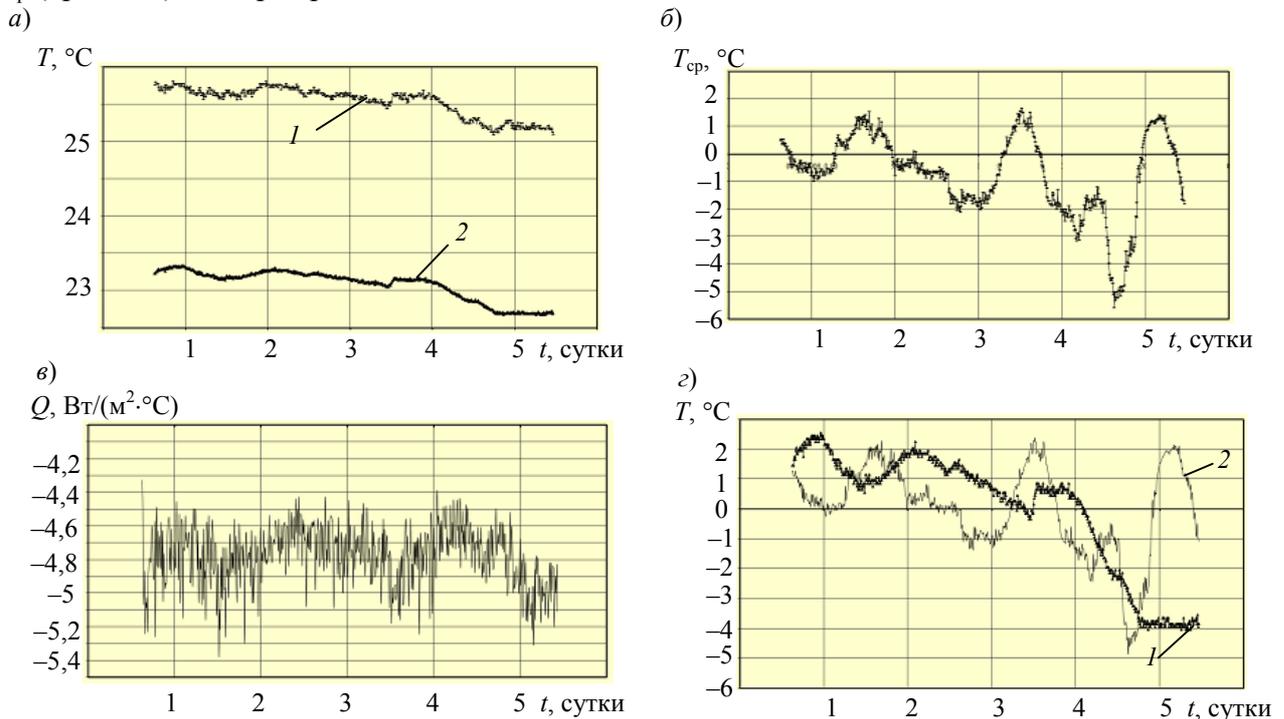


Рис. 2

Далее, согласно методике [2], по результатам измерений для расчетов выбирается период отклонения среднесуточной температуры наружного воздуха от среднего ее значения за этот период в пределах $\pm 1,5$ °С. Данные ограничения позволяют снизить влияние теплоемкости ограждающей конструкции (которая не учитывается в методике расчета тепловых сопротивлений) на тепловой поток. Вследствие непредсказуемости погодных явлений эти условия не всегда удается выполнить, но согласно методике [2] эти данные для расчетов не используются. Однако они содержат полезную информацию о поведении ограждающих конструкций в процессе изменения условий окружающей среды, что позволяет получить дополнительные данные для оценивания изоляционных свойств ОК.

Для оценки термического сопротивления ОК при нестационарном процессе можно использовать колебания температуры окружающей среды и колебания температуры внутренней поверхности стены. О теплофизических свойствах ОК можно судить по запаздыванию колебаний температуры ее внутренней поверхности относительно колебаний температуры окружающей среды, а также по коэффициенту передачи этих колебаний.

Определить запаздывание колебаний температуры внутри помещения относительно температуры окружающей среды можно путем определения взаимной спектральной плотности мощности [1]:

$$S_{xy}(f) = |X(f)Y^*(f)|,$$

где $X(f)$ — фурье-преобразование от колебаний температуры окружающей среды; $Y(f)$ — фурье-преобразование от колебаний температуры в помещении; $S_{xy}(f)$ — функция взаимной спектральной плотности мощности колебаний температуры в помещении и вне его.

Взаимная спектральная плотность мощности позволяет определить, какой частоте соответствует максимальная интенсивность взаимодействия между внешней средой и помещением, и чему равен фазовый сдвиг колебаний температуры внутри помещения относительно колебаний температуры вне его.

Как показывает анализ рис. 2, а, з, колебания температуры вне и внутри помещения происходят синхронно с периодом 24 ч, но с временным сдвигом, составляющим примерно 11 ч.

На рис. 3 показан результат вычисления функции взаимной спектральной плотности мощности, которая представлена как фаза (кривая 1) и модуль (кривая 2). Максимальное взаимодействие происходит на частоте $1 \cdot 10^{-4}$ Гц, что соответствует периоду в 24 ч, сдвиг по фазе составляет 3,45 рад, что соответствует временному сдвигу, равному 11,5 ч.

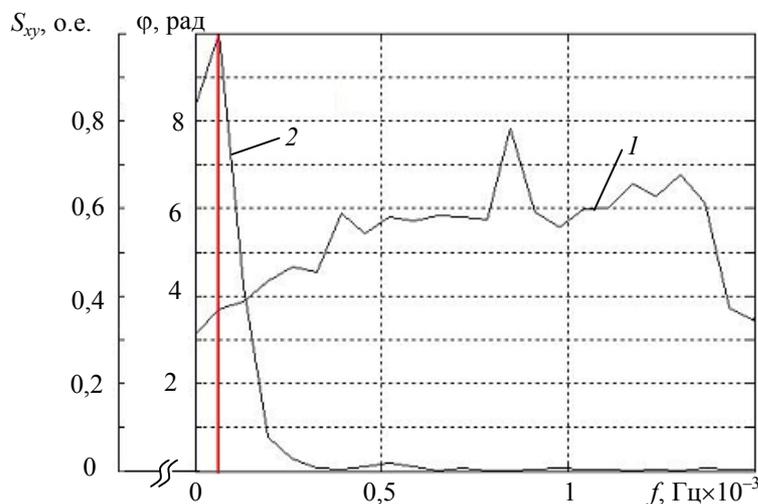


Рис. 3

Описанным выше образом были обработаны результаты измерений по 18 объектам с конструктивно схожими решениями. Результаты показали, что на 16 объектах значения фазового сдвига колебаний температуры внутри помещения относительно температуры вне его находятся в диапазоне от 3,4 до 3,8 рад. На данных объектах не было выявлено существенных дефектов тепловой изоляции, а термическое сопротивление по результатам измерений превышало нормативное значение. На двух объектах значение фазового сдвига составило менее 3,3 рад, а термическое сопротивление ограждающих конструкций было ниже нормативного.

Данные, полученные в результате экспериментальных исследований, позволяют оценить не только термическое сопротивление ограждающей конструкции, но и влияние ее теплоемкости на тепловые потоки и теплоизоляционные свойства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / Пер. с англ. М.: Мир, 1990.
2. Сидельников С. С., Лездин Д. Ю., Мотуз М. И. Комплексная методика контроля качества ограждающих конструкций зданий и сооружений. М.: Госстрой РФ, 2002.

Сведения об авторах

- Константин Сергеевич Костенко** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: kks@sald.ru
- Геннадий Николаевич Лукьянов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электроники; E-mail: gen-lukjanow@yandex.ru
- Дмитрий Сергеевич Петров** — ЗАО „Техника. Тепловидение. Медицина“, Санкт-Петербург, директор; E-mail: ttm@ttm.spb.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики
и энергофизического мониторинга СПбГУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.12.09 г.