

УДК 536.24:697.1

Круковский П.Г., Пархоменко Г.А., Полубинский А.С.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОПОТЕРЬ ПОМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Викладено методику визначення параметрів теплових втрат приміщення (теплопровідності внутрішніх та зовнішніх огорожуючих конструкцій, вікна та кратності повітрообміну) на основі тривимірних моделей теплового стану приміщення та даних вимірювань температури.

Изложена методика определения параметров теплопотерь помещения (теплопроводности внутренних и наружных ограждений, окна и кратности воздухообмена) на основе трехмерных моделей теплового состояния помещения и данных измерения температур.

The technique of definition of heat losses parameters (heat conductivity of inner and outer walls, window and air change rate) of an enclosure on the basis of three-dimensional thermal state models and the data of temperature measurement is stated.

A – эмпирический коэффициент;
 F – среднеквадратичное отклонение;
 H – высота;
 L – длина;

T – температура;
 W – ширина;
 x – координата;
 α – коэффициент теплоотдачи;
 λ – коэффициент теплопроводности.

Введение

Необходимость определения параметров теплопотерь (в частности коэффициентов теплопроводности наружных и внутренних ограждающих конструкций, окон, кратности воздухообмена) помещений возникает при решении вопросов контроля энергоэффективности и уровня теплопотерь через стены помещения, а также выработки решений по их снижению. Для определения этих параметров теплопотерь помещения существует ряд методик [1-4], в которых термические сопротивления окон и наружных стен определяются контактным методом с использованием одномерных моделей стационарной теплопроводности. Методика определения термических сопротивлений внутренних ограждающих конструкций в приведенных источниках не приводится. Недостатком такого подхода является то, что он не позволяет во многих реальных ситуациях натурального обследования помещений разместить необходимые датчики на поверхностях и поэтому дает локальные значения термических сопротивлений теплопередач че-

рез обследуемую конструкцию и не учитывает влияние локальных особенностей конструкции стен (оконные проемы, примыкающие стены). Термические сопротивления, определяемые нестационарным методом, приведенным в [5], не учитывают этих локальных особенностей ограждающих конструкций, а также расположения отопительных приборов возле этих конструкций. Такие допущения связаны с использованием упрощенных одномерных моделей теплового состояния ограждающих конструкций помещения, что не позволяет учитывать локальные неравномерности полей температуры и тепловых потоков и, в свою очередь, оказывает влияние на точность определения общих термических сопротивлений наружных ограждающих конструкций.

Использование трехмерных моделей теплового состояния ограждающих конструкций является, очевидно, более правильным подходом для определения эффективной теплопроводности и общего термического сопротивления ограждающих конструкций, необходимых для анализа теплопотерь исследуемого

помещения. Это позволит на основе детального анализа полей температур и тепловых потоков на поверхностях рассматриваемых ограждающих конструкций учитывать все особенности конструкции, такие как оконные проемы, прилегающие стены и перекрытия, а также учитывать влияние расположения отопительных приборов и радиаторных участков возле внутренних и наружных стен с повышенными уровнями температуры. Последнее особенно важно для более точного расчета полных теплотерь из помещений через ограждающие конструкции. Такой подход позволит изменить, расширить и сделать более информативным план возможных измерений температуры на ограждающих конструкциях, что в свою очередь позволит оперативно и более точно получить эффективное значение теплопроводности (термическое сопротивление) всей конструкции и полные теплотери через нее. Под эффективной теплопроводностью подразумевается среднее значение теплопроводности рассматриваемой ограждающей конструкции.

Целью работы является разработка методики определения (последовательной идентификации) параметров теплотерь (коэффициенты теплопроводности наружных и внутренних ограждающих конструкций, окон и кратность воздухообмена) помещения на основе трехмерных моделей теплового состояния и данных измерения температур в анализируемом помещении.

Идея работы состоит в применении трехмерных моделей стационарного теплового состояния помещений, которые учитывают все механизмы теплообмена ограждающих конструкций между собой и окружающей средой. В таких моделях свободноконвективный теплообмен с воздухом предлагается учитывать с помощью проверенных эмпирических зависимостей для среднего или локального значений коэффициентов теплоотдачи на вертикальных и горизонтальных поверхностях конструкций. Лучистый теплообмен рассчитывается в полной постановке с учетом угловых коэффициентов между поверхностями отопительного

прибора и ограждениями. Отказ от использования полной постановки задачи и решение трехмерной задачи только для теплопроводности и лучистого теплообмена связан с необходимостью быстрого получения решения прямой задачи (для быстрого решения обратных задач идентификации параметров), что не возможно в случае решения полной системы уравнений Навье-Стокса с учетом свободноконвективного теплообмена внутри помещения. В таком случае, реализация таких численных моделей в современных программных средах (типа ANSYS, STAR-CD, FLUENT и др.) может быть достаточно быстрой, что и требуется для экспресс-определения параметров теплотерь помещения, особенно если использовать технологию разработки так называемых параметрических моделей.

Пути достижения поставленной цели являются:

1. Разработка трехмерной модели теплового состояния ограждающих конструкций выбранного помещения, учитывающей конвективный и лучистый теплообмен внутри и снаружи помещения, кондуктивный теплообмен в конструкциях помещения, окне и кратность воздухообмена.

2. Разработка методики последовательного определения перечисленных параметров теплотерь помещения на основе трехмерных моделей и данных измерения температур.

3. Апробация разработанной методики определения перечисленных параметров теплотерь на основе вычислительного эксперимента.

4. Проведение натурных измерений температуры в выбранном помещении и апробация разработанной методики определения параметров теплотерь исследуемого помещения.

Отличие данной работы от работы [8] состоит в изложении и проверке работоспособности методики последовательного определения всех параметров теплотерь (теплопроводности внутренних и наружных ограждений, окна и величины кратности воздухообмена) помещения на основе трехмерных моделей теплово-

го состояния помещения и данных измерения температур, в то время как в работе [8] изложена методика определения только теплопроводности наружных ограждений.

Часть 1. Модель помещения

Рассматривалась трехмерная модель офисного помещения длиной 5,41 м, шириной 3,04 м и высотой 3,2 м (рис. 1). Толщина наружной стены 2 составляла 0,55 м, размер окна 2,1x2 м, толщина окна 0,2 м, толщина радиаторного участка стены 0,45 м, ширина радиаторного участка стены 0,8 м, ширина боковых вертикальных частей наружной ограждающей конструкции – 0,7 и 0,34 м. Помещение отапливается радиатором 5.

Поскольку в предлагаемой модели, как указывалось выше, не решается полная система уравнений Навье-Стокса для свободноконвективного теплообмена, то точности задания

коэффициентов теплоотдачи от воздуха в помещении к ограждающим конструкциям уделялось особое внимание. Средние коэффициенты конвективной теплоотдачи от воздуха в помещении к поверхностям ограждающих конструкций определялись по известной и хорошо опробованной эмпирической зависимости [6]:

$$\alpha = A \cdot \sqrt[3]{|T_B - T_i| + 60 v_B^2 / h}, \quad (1)$$

где T_B – температура воздуха внутри помещения, T_i – средняя температура i -й поверхности ограждающей конструкции (стены, потолка, пола, окна); A – эмпирический коэффициент, равный 1,66 для вертикальных поверхностей и 1,16 для горизонтальных поверхностей конструкций; v_B – средняя скорость воздуха у рассматриваемых поверхностей (принималась 0,3 м/с); h – характерный размер конструкций, – для стен высота помещения, для радиатора – высота радиатора, для пола и потолка – их длина.

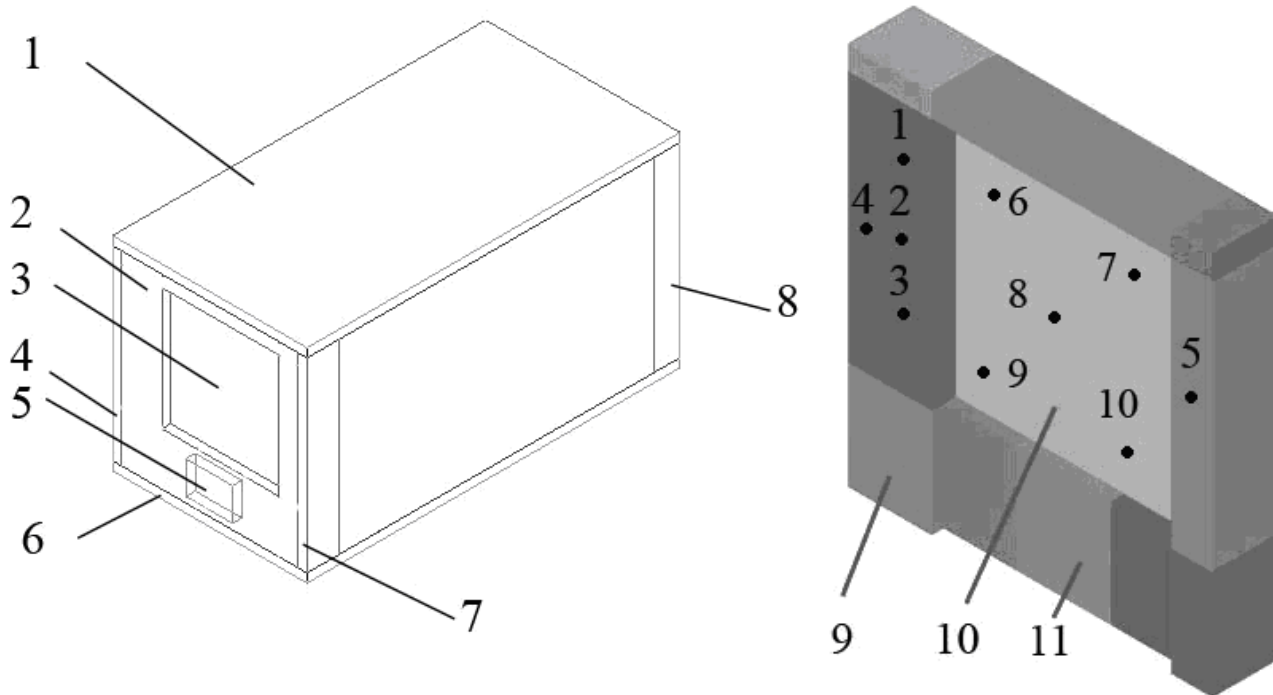


Рис. 1. Схема исследуемого помещения (а) и наружной ограждающей конструкции (б), вид изнутри помещения: 1 – потолок, 2 – наружная стена, 3 – окно, 4 – правая боковая стена, 5 – радиатор, 6 – пол, 7 – левая боковая стена, 8 – внутренняя стена; 9 – наружная стена, 10 – окно, 11 – радиаторный участок наружной стены, точки 1-10 точки измерения температур.

Конвективно-радиационный теплообмен от наружной поверхности ограждающей конструкции (наружной стены) в окружающий воздух определялся по эмпирической зависимости [7]:

$$\alpha = 7,74 \cdot v_B^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_B} + 5,67 \cdot \frac{\left(\frac{T_{CT}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{OC}}{100}\right)^4}{T_{CT} - T_{OC}}, \quad (2)$$

где v_B – скорость воздуха, обтекающего наружную поверхность наружной стены, T_{CT} – средняя температура наружной поверхности наружной стены, T_{OC} – температура окружающей среды.

Схема теплообмена помещения включает в себя кондуктивный теплообмен в ограждающих конструкциях, конвективный и радиационный теплообмен ограждающих конструкций с нагревательным прибором, конвективный теплообмен с воздухом внутри помещения и воздухообмен с окружающей средой.

Более детально математическая модель исследуемого помещения описана в [8].

Часть 2. Алгоритм идентификации параметров теплопотерь помещения

На основе разработанной модели и данных измерения температур воздуха внутри и снаружи помещения, а также значений температур в отдельных точках на внутренних поверхностях конструкций, проводилась последовательная идентификация эффективных значений коэффициента теплопроводности наружной стены помещения [8], коэффициента теплопроводности окна, потолка и кратности воздухообмена. Задача идентификации теплопроводности наружной стены, окна и потолка по имеющимся экспериментальным данным ставится как обратная задача [9] определения такого значения теплопроводности стены, окна или воздухообмена, для которого величина F среднеквадратичного отклонения расчетных и экспериментальных температур на поверхностях наружной стены или окна будет минимальной

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{Э,i} - T_{P,j})^2}{n}}, \quad (3)$$

где $T_{Э,i}$ – измеренное значение температуры; $T_{P,j}$ – значение температуры, получаемое в результате расчета, n – количество точек с измеренными температурами. При поиске эффективного значения коэффициента теплопроводности наружной стены помещения температуры на всех остальных конструкциях и температура воздуха задаются равными измеренным.

Аналогично ищутся эффективные значения коэффициента теплопроводности окна или потолка. При этом температуры на всех остальных конструкциях и температура воздуха задаются равными измеренным.

После определения коэффициентов теплопроводности ограждающих конструкций значение кратности воздухообмена вычисляется исходя из теплового баланса помещения. Отдельные составляющие теплового баланса помещения (значения тепловых потоков через ограждающие конструкции помещения) берутся из трехмерной модели. В рассматриваемом случае тепловой баланс помещения можно выразить следующей зависимостью

$$Q_{РАД} = Q_{НАР.СТ.} + Q_{ОК} + Q_{П} + Q_{ВЗ}, \quad (4)$$

где $Q_{РАД}$ – тепловой поток от радиатора; $Q_{НАР.СТ.}$ – тепловой поток через наружную стену в окружающую среду; $Q_{ОК}$ – тепловой поток через окно в окружающую среду; $Q_{П}$ – тепловой поток через потолок на чердак; $Q_{ВЗ}$ – тепловой поток с воздухообменом в окружающую среду, который и вычисляется из уравнения (4).

Тогда кратность воздухообмена в рассматриваемом помещении можно вычислить по следующей зависимости

$$m = \frac{Q_{ВЗ}}{\rho \cdot C \cdot V \cdot (T_B - T_{OC})},$$

где ρ – плотность воздуха, C – теплоемкость воздуха, V – объем исследуемого помещения; T_B – средняя температура воздуха в помещении; T_{oc} – температура окружающей среды.

Часть 3. Тестовая проверка алгоритма

Для проверки работоспособности предложенной методики, основанной на трехмерных моделях исследуемого помещения, был проведен следующий вычислительный эксперимент (решение прямой задачи) с помощью разработанной модели. Значения коэффициентов теплопроводности наружной стены были выбранными следующими: для внутренних и наружной стен – 0,8 Вт/(м·К), окна – 1 Вт/(м·К), пола и потолка – 0,7 Вт/(м·К), температура наружного воздуха принималась равной -3 °С, радиатора – 61 °С, степень черноты ограждающих конструкций – 0,95. В табл. 1 (колонка 2) приведены значения средних температур на наружной стене, окне и потолке, которые были получены в вычислительном эксперименте для определения значений коэффициента теплопроводности каждой конструкции. На внутренних стенах помещения и на полу температура составляла 18,6 °С.

Значение коэффициента теплопроводности наружной стены определялось решением обратных задач по методике, изложенной выше [8]. Полученные в вычислительном эксперимен-

те значения температуры исследуемой ограждающей конструкции и воздуха в помещении случайным образом искажались на величину – 1,5 %, что имитирует погрешность бесконтактного измерения температуры на исследуемых поверхностях с помощью пирометра (табл. 1, колонка 3).

В результате решения обратной задачи значение коэффициента теплопроводности наружной стены составило 0,814 Вт/(м·К) (точное значение 0,8), окна – 1,03 Вт/(м·К) (точное значение 1) и потолка – 0,68 Вт/(м·К) (точное значение 0,7), что дает погрешность 1,72 %, 3 % и 2,86 % соответственно. Среднеквадратичное отклонение (3) составило 0,11 °С. Расчетные значения температуры на наружной стене, окне и потолке после решения обратной задачи приведены в табл. 1 (колонка 4).

Часть 4. Определение теплопроводности внутренних и наружных ограждений, окна и кратности воздухообмена по данным экспериментальных измерений в помещении

В исследуемом офисном помещении было произведено реальное измерение температуры разных зон наружной ограждающей конструкций, окна и радиатора системы отопления, а также температуры воздуха внутри помещения и окружающей среды. Измерения производились бесконтактным методом с использовани-

Табл. 1. Значения температур в точках измерения

№ точки измерения температуры	Точное значение температуры, °С	Искаженное на 1,5 % значение температуры, °С	Расчетное значение температуры, °С
1	12,41	12,44	12,24
2	12,43	12,35	12,26
3	12,41	12,38	12,24
4	12,89	12,77	12,73
5 – окно	15	14,97	14,98
6 – потолок	18,6	18,52	18,63

ем инфракрасных пирометров [10], в частности пирометра Fluke 574, погрешность измерений которого составляет 1,5 %.

Время измерений температуры всех поверхностей помещения не превышало 15 минут при условии, что до момента измерения температура воздуха окружающей среды не менялась более чем на 10 % в течении трех суток. Погрешность экспериментального определения температуры не превышала 0,75 °С. Данные измерений приведены в табл. 2. На внутренних стенах помещения температура составляла 17,5 °С, на полу 17,0 °С, на потолке 16,2 °С. Скорость воздуха v_B в (2), обтекающего наружную стену, составляла 5 м/с.

По предложенной методике было определено значение эффективного коэффициента теплопроводности наружной ограждающей конструкции, окна и потолка помещения, а также кратности воздухообмена. Для этого была использована трехмерная модель помещения и экспериментально измеренные значения температуры внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции. Критерием правильности определения теплопроводности является величина среднеквадратичного отклонения получаемых с помощью модели значений температуры от эксперимен-

тально измеренных. Минимальному значению среднеквадратичного отклонения (3), равному 0,13 °С, соответствует значение коэффициента теплопроводности, равное 0,775 Вт/(м·К), которое и является эффективным (средним) для исследуемой наружной стены, найденное с помощью предложенной методики. Далее по приведенной выше методике последовательно определялись коэффициент теплопроводности окна, потолка и кратность воздухообмена. Коэффициент теплопроводности окна составил 0,72 Вт/(м·К), потолка 1,22 Вт/(м·К); кратность воздухообмена составила 0,59 м³/час.

Коэффициент теплопроводности внутренней стены, противоположной окну и смежных с окном стен, не определялся, т.к. теплотери из исследуемого помещения в примыкающий к нему коридор и смежные помещения минимальны вследствие малого перепада температуры воздуха. Разница температуры воздуха составляли не более 0,5 °С.

Полученные значения коэффициентов теплопроводности для наружной стены, потолка, окна, кратность воздухообмена и разработанная модель исследуемого помещения позволяют легко определить общие теплотери (для рассматриваемого помещения 951,9 Вт), что позволяет решать важные вопросы контроля

Табл. 2. Значения экспериментальных температур

№	Элемент помещения	Измеренные температуры, °С	Рассчитанные температуры, °С
1	Окружающая среда	-3	-3
2	Воздух в комнате	18,3	18,69
3	Наружная стена комнаты:		
	Точка 2 (рис. 1, б)	15,6	15,63
	Точка 3 (рис. 1, б)	15,6	15,63
	Точка 4 (рис. 1, б)	16,4	16,17
4	Зарadiatorный участок	32,8	33,11
5	Окно	13,0	12,93
6	Радиатор	61,0	61,0

энергоэффективности и уровня теплопотерь через отдельные ограждающие конструкции помещения, а также выработки решений по их снижению. Рассмотренным методом определены теплопотери через наружную стену, окно, потолок, а также теплопотери, вызванные воздухообменом, которые составили 204,1 Вт; 213,8 Вт; 298,9 Вт и 235,1 Вт, соответственно.

Выводы

1. Разработана трехмерная модель теплового состояния офисного помещения, учитывающая конвективный, лучистый теплообмен с воздухом внутри и снаружи помещения и кондуктивный в ограждающих конструкциях.

2. Разработана методика последовательного определения параметров теплопотерь исследуемого помещения – эффективной теплопроводности наружных стен, окна, потолка и воздухообмена помещения по данным измерения температур, учитывающая такие особенности конструкции, как оконные проемы, примыкающие стены и перекрытия, а также расположение отопительных приборов и радиаторных участков возле внутренних и наружных стен с повышенными уровнями температуры.

3. На основании вычислительного эксперимента проведена апробация разработанной методики определения теплопроводности наружной ограждающей конструкции, окна, потолка и кратности воздухообмена помещения по данным измерения температур с погрешностями измерений, близкими к реальным погрешностям эксперимента.

4. Проведены натурные измерения температур и с помощью разработанной методики получено значение коэффициента теплопроводности наружной ограждающей конструкции рассматриваемого помещения, равное 0,775 Вт/(м·К), окна 0,72 Вт/(м·К), потолка 1,22 Вт/(м·К) и величины кратности воздухообмена 0,59.

5. Определены общие теплопотери (951,9 Вт) и значения их отдельных составляющих: через наружную стену, окно, потолок, а также теплопотери, вызванные воздухо-

обменом, которые соответственно составили 204,1 Вт; 213,8 Вт; 298,9 Вт и 235,1 Вт.

ЛИТЕРАТУРА

1. *ВЕМО 05.00.00.000 ДМ*. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом (летний вариант). <http://www.wemo.ru/offers/metodiki.htm>.

2. *ГОСТ 26254 – 84* «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций».

3. *ДСТУ 9864 – 2004* Теплоизоляция. Строительные элементы. Натурные измерения теплового сопротивления и коэффициента теплопередачи.

4. *МДС 13 – 20.2004* Комплексная методика по обследованию и энергоаудиту реконструируемых зданий.

5. *Круковский П.Г., Пархоменко Г.А., Тадля О.Ю., Метель М.А.* Идентификация параметров теплопотерь помещения по бесконтактным измерениям температур // *Промышленная теплотехника*. – 2009. – №3. – С.69 – 76.

6. *В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел.* Теплопередача.: Учебник для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп. – М., «Энергия», 1975. – 488 с.

7. *Леденев В.И., Матвеева И.В.* Физико-технические основы эксплуатации наружных кирпичных стен гражданских зданий. Уч. Пособие – Тамбов: Изд. ТГТУ, 2005. – 160 с.

8. *Круковский П.Г., Пархоменко Г.А., Полубинский А.С.* Определение теплопроводности наружных стен на основе трехмерных моделей помещения // *Промышленная теплотехника*. – 2010. – №2. – С. 82 – 89.

9. *Круковский П.Г.* Обратные задачи тепло-массообмена (общий инженерный подход): Киев: Ин-т технической теплофизики НАН Украины, 1998. – 224 с.

10. *Криксунов Л.З.* Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Советское радио, 1978. – 400 с.

Получено 01.03.2010 г.