

УДК 536.24:697.1

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

Институт технической теплофизики НАН Украины

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАРУЖНЫХ СТЕН
НА ОСНОВЕ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПОМЕЩЕНИЯ

Викладена методика визначення ефективного коефіцієнта теплопровідності зовнішніх огорожуючих конструкцій приміщення на основі тривимірних моделей та даних вимірювань температури в досліджуваному приміщенні.

Изложена методика определения эффективного коэффициента теплопроводности наружных стен помещения на основе трехмерных моделей и данных измерения температур в анализируемом помещении.

The technique of definition of effective external walls heat conductivity of an enclosure on the basis of three-dimensional models and the data of temperature measurement in an analyzed enclosure 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 коэффициентов теплопроводности ограждающих конструкций (в частности наружных стен) помещений возникает при решении вопросов контроля энергоэффективности и уровня теплопотерь через стены помещения, а также выработки решений по их снижению. Для определения теплопотерь помещения существует ряд методик [1-4], в которых термические сопротивления окон и наружных стен определяются контактным методом с использованием одномерных моделей стационарной теплопроводности. Недостатком такого подхода является то, что он не позволяет во многих реальных ситуациях натурального обследования помещений разместить необходимые датчики на обследуемых поверхностях, дает локальные значения термических сопротивлений теплопередаче через обследуемую конструкцию, не учитывает влияние локальных особенностей конструкции исследуемых стен (оконные проемы, прилегающие стены). Термические сопротивления, определяемые нестационарным методом, приведенным в [5], также не учитывают этих

локальных особенностей ограждающих конструкций, а также расположения отопительных приборов возле этих конструкций. Такие допущения связаны с использованием упрощенных 1-мерных 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 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 теплопотерь 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 получить эффективное значение теплопроводности (термическое сопротивление) всей конструкции и полные теплопотери через нее. Под эффективной теплопроводностью подразумевается среднее значение теплопроводности рассматриваемой ограждающей конструкции.

Целью работы является разработка методики определения эффективной теплопроводности наружных стен 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 этих моделях свободноконвективный теплообмен с воздухом предлагается учитывать с помощью хорошо зарекомендовавших себя эмпирических зависимостей для среднего или локальных коэффициентов теплоотдачи от вертикальных и горизонтальных поверхностей конструкций, а лучистый теплообмен рассчитывать в полной постановке с учетом угловых коэффициентов между поверхностями отопительного прибора и ограждениями. Уход от полной постановки задачи и решение трехмерной задачи только для теплопроводности и лучистого теплообмена связан с желанием получения быстрого решения прямой задачи (для быстрого решения обратных задач идентификации параметров), что не возможно в случае необходимости решения полной системы уравнений Навье-Стокса, для свободноконвективного теплообмена внутри помещения. Тогда реализация таких численных моделей в современных программных средах (типа ANSYS, STAR-CD, FLUENT и др.) может быть достаточно бы-

строй, что и требуется для экспресс определения эффективной теплопроводности наружных стен помещения, особенно если использовать технологию разработки так называемых параметрических моделей.

Для достижения цели необходимо выполнить следующие работы:

1. Для выбранного помещения разработать трехмерную модель теплового состояния ограждающих конструкций, учитывающую конвективный и лучистый теплообмен внутри и снаружи помещения и кондуктивный теплообмен в конструкциях помещения.

2. Разработать методику определения эффективной теплопроводности наружных стен помещения на основе трехмерных моделей и данных измерения температур.

3. На основе вычислительного эксперимента провести апробацию разработанной методики определения теплопроводности по данным измерения температур с ошибками, моделирующими погрешности реального эксперимента.

4. Сравнить результаты определения теплопроводности предлагаемым и имеющимися методами, в частности с методикой ДСТУ 9864 – 2004 [3], а также исследовать влияние особенностей конструкции наружной стены на точность определения теплопроводности этим методом.

5. Провести натурные измерения температуры в выбранном помещении и провести апробацию разработанной методики определения теплопроводности наружной стены.

Изложенное ниже последовательно освещает выполнение таких работ.

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.

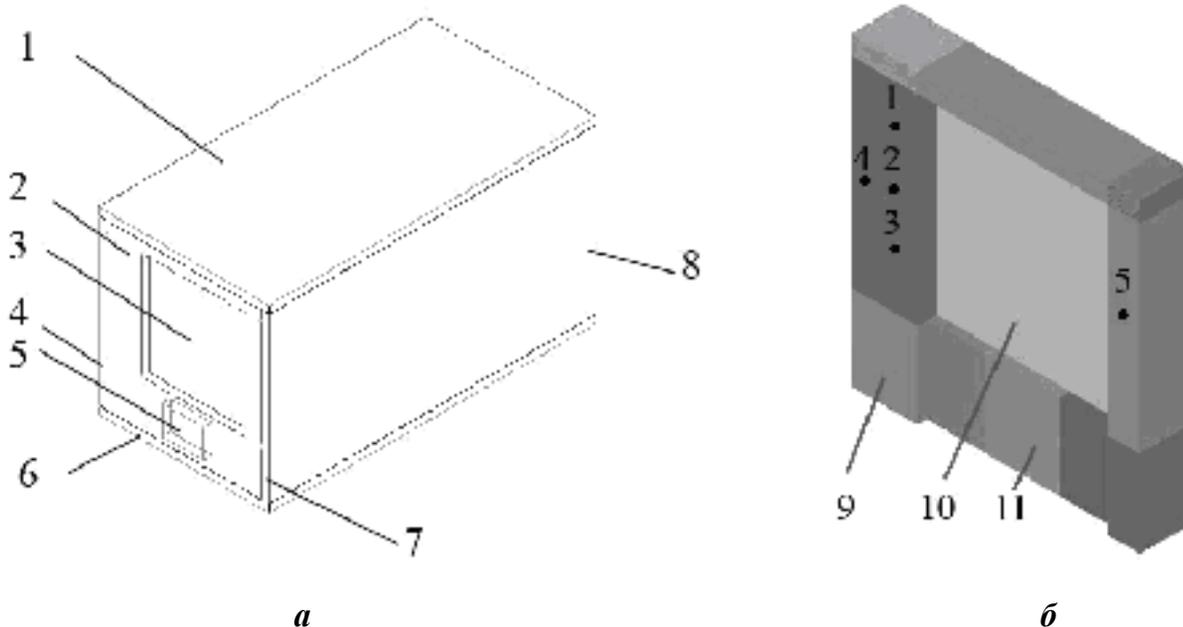


Рис. 1. Схема исследуемого помещения (а) и наружной ограждающей конструкции (б), вид изнутри помещения. 1 – потолок, 2 – наружная стена, 3 – окно, 4 – правая боковая стена, 5 – радиатор, 6 – пол, 7 – левая боковая стена, 8 – внутренняя стена; 9 – наружная стена, 10 – окно, 11 – зарadiatorный участок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

Конвективно-радиационный теплообмен от наружной поверхности наружной 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.

Таким образом, при теплообмене конструкций помещения учитывается конвективный и радиационный теплообмен ограждающих конструкций с нагревательным прибором и воздухом внутри помещения и окружающей средой, а также кондуктивный теплообмен внутри конструкций. Температура воздуха внутри и снаружи помещения, а также скорость воздуха снаружи помещения заданы (измерены). Следует еще раз отметить, что нелинейные зависимости (1) и (2) дают возможность нахождения средних коэффициентов теплоотдачи на вертикальных и горизонтальных поверхностях ограждающих конструкций, что является определенным допущением модели, которое на наш взгляд является приемлемым для практического случая решения поставленной выше задачи. При этом поле температур на поверхностях ограждающих конструкций является трехмерным и определяется особенностями этих конструкций и их радиационно-конвективным теплообменом с воздухом внутри и снаружи помещения. В случае, если на поверхностях ограждений имеются участки с особыми условиями теплообмена (например, радиаторный участок), то они выделяются в отдельные зоны и к ним применяются зависимости типа (1), но со своими температурами воздуха у этих поверхностей.

Радиационный теплообмен между радиатором и ограждениями учитывается для всех расчетных ячеек на поверхностях (без осреднения по поверхностям) с помощью соответствующих численных методов, хорошо представленных в упомянутых выше программных средах. Исследования данной работы проводились в программной среде STAR-CD [8].

Математическая модель теплового режима рассматриваемого помещения представляет собой дифференциальные уравнения теплопроводности и лучистого теплообмена для

трехмерного стационарного случая с нелинейными граничными условиями на поверхностях ограждающих конструкций конвективно-радиационного вида. Сеточная модель насчитывала 72 тыс. расчетных ячеек. Поле температур в конструкциях помещения рассчитывалось примерно за 3 минуты на ПК средней производительности.

В модели в качестве отдельной зоны была введена поверхность радиаторного участка (позиция 11 на рис. 1,б). Этот участок стены является особой зоной, имеющей меньшую по сравнению с основной стеной толщину и более высокую температуру поверхности ввиду близкого расположения к обогревательному прибору (в нашем случае радиатору типа М-140 водяной централизованной системы отопления размерами 0,8х0,58х0,16 м).

Алгоритм идентификации теплопроводности наружных стен 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 идентификация эффективного значения коэффициента теплопроводности наружной стены помещения. Задача идентификации теплопроводности наружной стены по имеющимся экспериментальным данным ставится как обратная задача [9] определения такого значения теплопроводности стены, для которого величина F среднеквадратичного отклонения расчетных и экспериментальных температур на поверхностях наружной стены будет минимальной

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

где $T_{Э,i}$ – измеренное значение температуры; $T_{P,i}$ – значение температуры, получаемое в результате расчета, n – количество точек с измеренными температурами. При поиске эффективного значения коэффициента теплопроводности

сти наружной стены помещения температуры на всех остальных конструкциях и температура воздуха задаются равными измеренным. Приведенный выше алгоритм определения коэффициента теплопроводности наружной стены является одним из этапов методики последовательной идентификации параметров теплопотерь помещения, описанной в [9], но позволяющий более точно определять эту теплопроводность вследствие учета в трехмерной модели радиаторного участка и оконного проема в наружной стене.

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 5 °С, радиатора 50 °С, степени черноты ограждающих конструкций 0,95. В табл. 1 (колонка 2) приве-

дены значения температуры на наружной стене, которые были получены в вычислительном эксперименте для определения коэффициента теплопроводности наружной стены. На внутренних стенах помещения, на полу и на потолке температура составляла около 18,6 °С.

Значение коэффициента теплопроводности наружной стены определялось решением обратных задач по методике, изложенной выше. Полученные в вычислительном эксперименте значения температуры исследуемой ограждающей конструкции случайным образом искажались на величину – 1,5 %, что имитирует погрешность бесконтактного измерения температуры на внутренней поверхности наружной ограждающей конструкции в 5-ти точках (рис. 1, б) 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), что дает погрешность 1,72 %, среднеквадратичное отклонение (3) составило 0,11 °С. Расчетные значения температуры на наружной стене после решения обратной задачи приведены в табл. 1 (колонка 4).

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	2	3	4
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

Использование методики, изложенной в ДСТУ 9864 – 2004 [3] для определения значения коэффициента теплопроводности по данным измерений температуры и теплового потока в точке 2 (рис. 1, б), дает значение коэффициента теплопроводности по данным вычислительного эксперимента, равное 0,718 Вт/(м·К), а по-

грешность ее определения составила 10,14%. Видно, что применение методики ДСТУ 9864 – 2004 [3] приводит к большим погрешностям, что объясняется использованием в этой методике одномерной модели нестационарной теплопроводности, которая не учитывает реальные особенности наружных стен помещений, о ко

торых говорилось выше и более подробно анализируется ниже.

Влияние оконного проема на точность определения теплопроводности наружной стены

Как указано в ДСТУ 9864– 2004 [3], при определении термического сопротивления ограждающей конструкции с окном расположение измерительных датчиков можно определить термографией исследуемой поверхности стены согласно ISO 6781[10], в пределах которой нет теплопроводных включений, щелей и других аналогичных источников погрешностей. Нами было проведено исследование влияния положения точки измерения температуры и плотности теплового потока на величину теплопроводности наружной ограждающей конструкции, определяемой по методике [3].

Напомним, что точное значение теплопроводности стены было принято 0,8 Вт/(м·К). На рис. 2 изображен фрагмент сетки исследуемой ограждающей конструкции. Отсчет координаты велся от кромки ограждающей конструкции, противоположной окну.

Полученные значения коэффициента теплопроводности представлены на рис. 3.

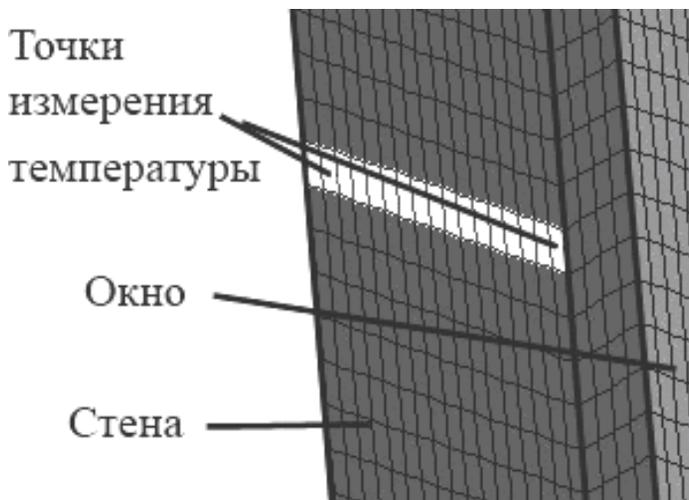


Рис. 2. Зона измерения температур и плотности теплового потока на левой части наружной стены между левой боковой стеной и оконным проемом.

Видно, что коэффициент теплопроводности наружной стены сильно зависит от координаты точки, в которой производилось измерение значений температуры и плотности теплового потока.

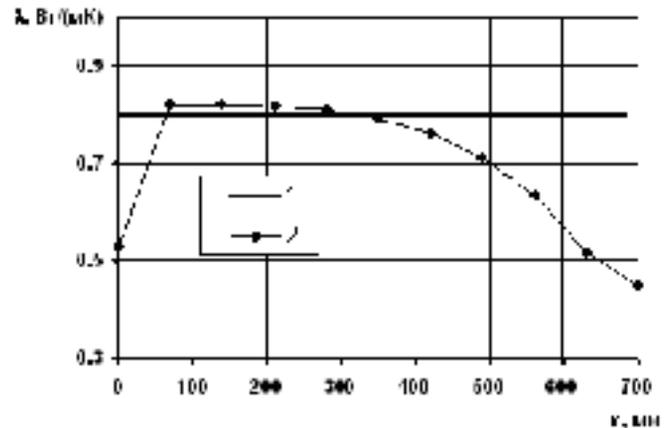


Рис. 3. Зависимость теплопроводности от расположения точек измерения температуры и плотности теплового потока на поверхности стены (рис. 2) 1 – точное значение коэффициента теплопроводности, 2 – полученные по [3].

Как видно из рис. 3, расположение точки измерения значений температуры и плотности теплового потока, применяемое в ДСТУ [3] для вычисления коэффициента теплопроводности, сильно влияет на его значение. Значение теплопроводности наружной стены, близкое к истинному, достигается на расстоянии 350 мм от оконного проема. При проведении измерений в других точках, погрешность определения коэффициента теплопроводности находится в пределах от 2,4 до 43,7 %. Точка 700 мм находится на краю оконного проема.

Определение теплопроводности наружной стены по данным экспериментальных измерений в помещении

В исследуемом офисном помещении было произведено реальное измерение темпера

туры разных зон наружной ограждающей конструкции, окна и радиатора системы отопления, а также температуры воздуха внутри помещения и окружающей среды. Измерения производились бесконтактным методом с использованием инфракрасных пирометров [11], в частности пирометра Fluke 574, погрешность измерений которого составляет 1,5 %.

Время измерений температуры всех поверхностей помещения не превышал 25 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.

Табл. 2. Значения экспериментальных температур

№	Элемент помещения	Измеренные температуры, °С	Рассчитанные температуры, °С
1	Окружающая среда	4	-
2	Воздух в комнате	18,6	-
3	Наружная стена комнаты:		
	Точка 2 (рис. 1, б)	16,6	16,75
	Точка 3 (рис. 1, б)	17,0	16,75
	Точка 4 (рис. 1, б)	17,0	16,9
4	Зарадиаторный участок	24,8	23,56
5	Окно	15,2	-
6	Радиатор	40,8	-

На внутренних стенах помещения температура составляла 17,5 °С, на полу 17,6 °С, на потолке 18,2 °С. Скорость воздуха v_v в (2), обтекающего наружную стену, составляла 5 м/с.

По предложенной методике было произведено определение эффективного коэффициента теплопроводности наружной ограждающей конструкции помещения. Для этого определения использовалась 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 экспериментально измеренных. Минимальному значению среднеквадратичного отклонения (3), равному 0,17 °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.

Полученное значение коэффициента теплопроводности для наружной стены и разработанная математическая модель исследуемого помещения позволяют легко определить общие теплотери через эту стену, (для рассматриваемого помещения 131,5 Вт), что позволяет решать важные вопросы контроля энергоэффективности и уровня теплотерь через стены помещения, а также выработки решений по их снижению.

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 определения эффективной теплопроводности наружных стен помещения на основе трехмерных моделей теплового состояния этих помещений и данных 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 по данным измерения температур с погрешностями измерений, близкими к реальным погрешностям эксперимента.

4. Показано влияние оконного проема в стене на погрешность определения коэффициента теплопроводности ограждающей конструкции с помощью методики ДСТУ 9864, значение которой для рассматриваемой конструкции могло составлять 43 %.

5. Проведены натурные измерения температур и с помощью разработанной методики получено значение коэффициента теплопроводности наружной ограждающей конструкции рассматриваемого помещения, равное 0,775 Вт/(м·К), что позволяет решать важные вопросы контроля энергоэффективности и уровня теплопотерь через стены помещения, а также выработки решений по их снижению.

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. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. 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. STAR-CD version 3.15, Methodology, CD Adapco Group, Computational Dynamics Limited, 2001.

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

10. ISO 6781 – Thermal insulation – Qualitative detection of thermal irregularities in building envelopes – Infrared method.

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

Получено 11.01.2010 г.