

Комплексный тепловой контроль и дефектометрия качества строительства административных и жилых строительных сооружений

О. Н. Будадин, О. В. Лебедев, В. Г. Авраменко, Д. В. Киржанов, Е. В. Абрамова
Технологический институт энергетических исследований, диагностики
и неразрушающего контроля «ВЕМО», Россия, 113162, Москва, Люсиновская ул., д. 62
Институт Машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
Россия, Малый Харитоньевский пер., д. 4.

Введение

В настоящее время много внимания уделяется решению проблем строительства и реконструкции зданий с целью обеспечения комфортного пребывания в них людей при эффективном использовании энергоносителей. Это связано с тем, что значительная часть основных фондов производственных строительных конструкций превысила допустимый ресурс эксплуатации, что привело к увеличению расхода энергоносителей. Нормальной практикой на территории России являются показатели удельного потребления условного топлива на человека, превышающие в несколько раз аналогичные западные [1]. В этом виноваты не только климатические условия, но состояние жилищного фонда. По экспертным оценкам Госстроя РФ, только в зданиях массовых серий сверх нормы теряется до 40 % поступающих в них энергоресурсов. С целью экономии топливно-энергетических ресурсов издан Указ Президента РФ [2]. Ужесточение требований к энергосбережению на территории России регламентируется СНиП³ и ГОСТ [4], а в Москве – московскими городскими строительными нормами⁵. Энергетической стратегией России на период до 2020 года определено, что до $\frac{3}{4}$ необходимого прироста энергопотребления страны должно быть обеспечено за счет энергосберегающих мероприятий. Таким образом, энергоэффективность и энергосбережение являются приоритетами энергетической стратегии России.

Актуальность данной работы подтверждается рекомендациями и нормативными документами, а именно протоколом совместного заседания Совета Безопасности Российской Федерации и президиума Государственного совета Российской Федерации [6], согласно которому следует «сконцентрировать усилия и ресурсы на реализации конкурентно способных технологий, направленных на повышение эффективности использования энергетических и природных ресурсов и других перспективных технологий». Перспективность метода теплового неразрушающего контроля подтверждается Указом Президента Российской Федерации [7], согласно которому была присуждена Государственная премия в области науки и техники за 2003 год. Правительством Москвы принято Постановление [8], направленное на развитие инновационных научно-исследовательских программ в сфере энергосбережений. Аналогичные постановления сейчас утверждаются в Санкт-Петербурге, Тамбовской, Калининградской и других регионах Российской Федерации, а территориальные строительные нормы приняты сейчас уже в 32 областях России.

Основной теплотехнической характеристикой, на основании которой делается заключение о соответствии строительной конструкции нормативным требованиям и эксплуатационным нормам, является приведенное сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций, вычисляемое на основе локальных величин сопротивления теплопередаче каждого из типичных фрагментов наружных ограждающих конструкций здания. Рассматриваемый метод определения приведенного сопротивления теплопередаче разработан в Технологическом институте ВЕМО [9, 10]. Метод успешно апробирован на крупнейших конференциях, посвящённых методам неразрушающего контроля, включая международные конференции [11].

Целью работы является создание метода, предназначенного для определения теплотехнических характеристик строительных сооружений с оценкой энергоэффективности ограждающих конструкций по результатам теплового неразрушающего контроля (ТНК). Созданный метод носит название «метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче многослойной ограждающей конструкции в реальных условиях эксплуатации зданий методом решения обратной задачи теплопроводности, использующий функционал правдоподобия на основе конечно-разностной схемы» или сокращенно метод «функционала правдоподобия на основе конечно-разностной схемы».

Описание метода

Метод «функционала правдоподобия» на основе конечно-разностной схемы предназначен для определения теплотехнических характеристик строительных сооружений с оценкой энергоэффективности ограждающих конструкций по результатам ТНК.

Разработанный метод осуществляет обработку экспериментальных данных, полученных в ходе тепловизионного обследования, и реализует математические алгоритмы ТНК. Анализ возможностей метода ТНК показал, что он с успехом может применяться не только для качественного анализа температурных полей, но и для количественного определения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций при использовании специальных расчетных моделей, а именно, значения сопротивления теплопередаче в реперных точках и приведенного сопротивления теплопередаче. Метод позволяет осуществлять высокопроизводительную бесконтактную диагностику с применением компьютерной техники для обработки результатов.

Постановка задачи

Основными параметрами, количественно определяющими энергосберегающие свойства ограждающей конструкции, являются сопротивление теплопередаче термически однородных зон R^{loc} и приведенное сопротивление теплопередаче, R^{av} учитывающее неравномерность распределения температуры по поверхности контролируемого объекта.

В основе метода лежит модель многослойного объекта, которая используется для описания ограждающей конструкции. Для многослойного объекта локальное значение сопротивления теплопередаче выражается формулой

$$R^{loc} = \frac{1}{\alpha^{in}} + \frac{1}{\alpha^{ex}} + \sum_{n=1}^N \frac{l_n}{\lambda_n}$$

В формуле α^{in} , α^{ex} – коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней поверхностях объекта, N – число слоев конструкции, l_n – толщина слоя n , λ_n – коэффициент теплопроводности слоя n . Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции определяется формулой

$$R^{av} = \sum_{j=1}^J S_j \left(\sum_{j=1}^J \frac{S_j}{R_j^{loc}} \right)^{-1}$$

В формуле J – число термически однородных зон ограждающей конструкции. Каждая термически однородная зона j имеет площадь S_j , а каждой её точке соответствует локальное сопротивление теплопередаче R_j^{loc} , определённое по формуле .

Согласно существующим методикам [12] величина сопротивления теплопередаче в реперных точках конструкции определяется экспериментально с использованием датчиков плотности теплового потока и датчиков температуры сред по обе стороны ограждающей конструкции с помощью соотношения по формуле .

$$R^{loc} = \frac{T_{in}^{air} - T_{ex}^{air}}{I}$$

В формуле T_{in}^{air} , T_{ex}^{air} – температуры воздуха вблизи, соответственно, внутренней и внешней поверхностей ограждающей конструкции, I – плотность теплового потока через ограждающую конструкцию.

Указанные методики ориентированы на применение в условиях стационарного процесса теплопередачи в ограждающих конструкциях. В действительности стационарный режим теплопередачи в конструкции может быть создан только в лабораторных условиях. При теплотехническом обследовании строительных объектов в условиях их эксплуатации такие условия недостижимы. В этом случае режим передачи тепла является нестационарным вследствие суточных колебаний температуры наружного воздуха, резкой смены погоды и других причин.

Таким образом, необходимо создание альтернативных методов определения локальных и интегральных теплотехнических характеристик ограждающих конструкций. Альтернативный метод должен позволять проводить определение требуемых характеристик в условиях, достижимых при эксплуатации обследуемых конструкций. Ниже рассмотрена методика определения этих характеристик с использованием термограмм обследуемого объекта и температурной истории (серии значений температур через заданные интервалы времени) в реперных точках. При этом температурная история в каждой из реперных точек используется для определения сопротивления теплопередаче в ней. Эта достигается путём решения обратной задачи нестационарной теплопроводности в условиях нестационарного режима передачи тепла через ограждающую конструкцию. Полученные значения локальных теплотехнических характеристик и термограмма ограждающей конструкции используются для определения интегральных характеристик конструкции.

Способ определения локальных теплотехнических характеристик

Решение обратной задачи нестационарной теплопроводности в многослойном объекте состоит в определении величин теплофизических характеристик слоев этого объекта по заданным временным зависимостям температур сред вблизи поверхностей объекта и температур самих поверхностей. В основе решения обратной задачи лежит многократное использование решений прямой задачи нестационарной теплопроводности. Решается одномерная прямая задача нестационарной теплопроводности. Приведённые ниже выкладки применимы как для описания многослойных, так и однослойных объектов, поэтому, в дальнейшем будут рассматриваться многослойные объекты. Рассмотрим многослойный объект, изображённый на рисунке 1.

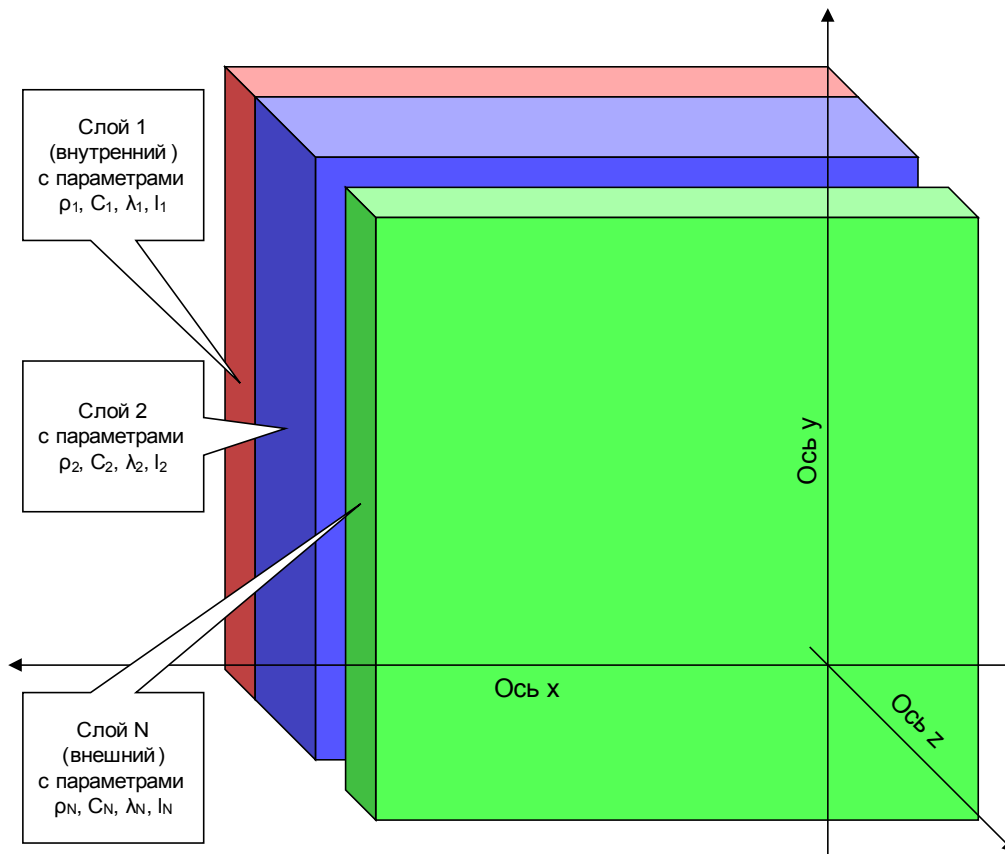


Рисунок 1. Многослойный объект, в котором решение одномерной задачи теплопроводности считается справедливым.

Обозначим $T(z, t)$ зависимость температуры от координаты z и времени t . Уравнение теплопроводности имеет вид . Значения $C(z)$, $\rho(z)$ и $\lambda(z)$ представляют собой значения теплофизических характеристик: удельной теплоемкости, плотности и коэффициента теплопроводности материалов слоев. Они считаются постоянными внутри каждого из слоёв и независимыми от температуры, а, следовательно, задаются кусочно-постоянными функциями координаты z .

$$C(z) \rho(z) \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \lambda(z) \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2}$$

Входные данные

Для расчета приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций используются следующие входные данные:

1. термограмма наружных ограждающих конструкций исследуемого объекта. Далее под термограммой понимается матрица со значениями интенсивности. Соответствие интенсивностей и яркостного поля исследуемой конструкции устанавливается следующим образом. Термограммы различных зон исследуемой конструкции компонуются в единое изображение. Затем из всего изображения выбираются те участки, приведенное сопротивление которых необходимо рассчитать. На заключительном этапе, цветное изображение яркостного поля выбранных участков преобразуется в черно-белое изображение (интенсивность черно-белого изображения в некоторой точке равна целому числу из интервала $[0, 255]$). Рассчитанный указанным образом массив значений и обозначается в дальнейшем как термограмма.
2. Натурные измерения температур

- 2.1. внешнего воздуха
- 2.2. внешней поверхности ограждающей конструкции
- 2.3. внутреннего воздуха в реперной точке в момент снятия термограммы.
3. рассчитанное значение сопротивления теплопередаче в реперной точке.
4. данные для калибровки тепловизионных измерений:
5. значение величин температуры в нескольких (двух и более) точках на внешней поверхности ограждающих конструкций.
6. значение интенсивностей термограммы в этих же точках.

Алгоритм преобразования термограммы

Для расчета приведенного сопротивления теплопередаче необходимо установить соответствие между значениями интенсивностей точек термограммы и температурами в этих точках. В программе используется специальная функция установления соответствия. Это реализовано по следующей причине. Как правило, функция восстановления температурного поля по термограмме, приведенная в руководстве тепловизора, достаточно сложна и содержит большое количество теплофизических параметров окружающей среды (например, влажность, температура окружающего воздуха) и поверхности объекта (её излучательная способность или степень черноты), которые сложно определить непосредственно при обследовании. Поэтому, задавая эти параметры на основе какой-либо модели, а не прямого измерения, можно получить значения температур с большой погрешностью. К тому же функция восстановления температурного поля может различаться для разных моделей тепловизоров, и описанный алгоритм (и основанная на нем программа) не будет обладать универсальностью. Для установления указанного соответствия зависимость интенсивность точек термограммы от значений температур в этих точках раскладывается в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned}
 I(x, y) = & F(\{\theta\}, T(x, y)) ; F(\{\theta\}, T(x_0, y_0)) + \\
 & + T(x_0, y_0) \left. \frac{\partial F(\{\theta\}, T(x, y))}{\partial T(x, y)} \right|_{x_0, y_0} \frac{T(x, y) - T(x_0, y_0)}{T(x_0, y_0)} + \\
 & + \frac{T^2(x_0, y_0)}{2} \left. \frac{\partial^2 F(\{\theta\}, T(x, y))}{\partial T^2(x, y)} \right|_{x_0, y_0} \frac{\left(\frac{T(x, y) - T(x_0, y_0)}{T(x_0, y_0)} \right)^2}{2} + \dots
 \end{aligned}$$

Здесь $\{\theta\}$ – набор теплофизических параметров, влияющих на интенсивность термограммы, $T(x, y)$ - истинное значение температуры на поверхности исследуемого объекта, $I(x, y)$ - некоторая функция, измеренная при помощи тепловизора. Для определённости за $I(x, y)$ следует принять температуру, измеряемую тепловизором при некоторых оговорённых заранее параметрах работы прибора. Ограничимся в зависимости первыми двумя членами разложения и введём измеренную температуру поверхности объекта $\mathcal{P}(x, y)$ по правилу . Будем считать, что некоторые коэффициенты A и B имеют одинаковое значение для всех точек термограммы.

$$\mathcal{P}(x, y) = A + BI(x, y)$$

Выделим на термограмме объекта точки, соответствующие ограждающей конструкции. Очевидно, что число таких точек конечно. Пронумеруем эти точки от 1 до N и получим соответствующий им ряд значений $\mathcal{P}(x_n, y_n)$, $n = 1 \dots N$. Далее величины $\mathcal{P}(x_n, y_n)$, $I(x_n, y_n)$ и $T(x_n, y_n)$ мы будем обозначать \mathcal{P}_n^\pm , I_n и T_n . Для установления

соответствия между величинами T_n и \bar{T}_n^\pm , $n = 1 \dots N$, воспользуемся дополнительными экспериментальными данными.

Из N точек термограммы выделим M , в которых измерим температуру поверхности объекта при помощи откалиброванного измерительного прибора, например, контактного термометра. Определим коэффициенты A и B по методу наименьших квадратов:

$$D(A, B) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \left(\bar{T}_m^\pm - T_m \right)^2$$

Подстановка в уравнение выражения для \bar{T}_m^\pm и условий $\frac{\partial D(A, B)}{\partial A} = 0$ и $\frac{\partial D(A, B)}{\partial B} = 0$ даёт систему уравнений для определения коэффициентов A и B . Система уравнений имеет решение, определяющее значения искоемых коэффициентов.

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^M 2AM + 2B \sum_{m=1}^M I_m - 2 \sum_{m=1}^M T_m = 0 \\ \sum_{m=1}^M 2A \sum_{m=1}^M I_m + 2B \sum_{m=1}^M I_m^2 - 2 \sum_{m=1}^M T_m I_m = 0 \end{cases}$$

$$A = \frac{\sum_{m=1}^M T_m \sum_{m=1}^M I_m^2 - \sum_{m=1}^M I_m \sum_{m=1}^M T_m I_m}{\sum_{m=1}^M I_m^2 - \left(\sum_{m=1}^M I_m \right)^2 / M}, \quad B = \frac{\sum_{m=1}^M T_m I_m - \sum_{m=1}^M T_m \sum_{m=1}^M I_m / M}{\sum_{m=1}^M I_m^2 - \left(\sum_{m=1}^M I_m \right)^2 / M}$$

Вычисление коэффициентов A и B позволяет перейти от измеренного массива значений I_n к массиву значений \bar{T}_n^\pm с измеренными значениями температур поверхности в точках выбранных ограждающей конструкции.

Алгоритм расчета приведенного сопротивления теплопередаче

Расчет приведенного сопротивления теплопередаче R_{av} проводится в рамках следующих приближений:

1. в момент проведения тепловизионной съемки внутри наружных ограждающих конструкций реализуется стационарный процесс теплопередачи
2. температура внутреннего (наружного) воздуха постоянна вблизи всей внутренней (внешней) поверхности ограждающих конструкций
3. коэффициент теплоотдачи на внешней поверхности стены одинаков для всех точек внешней поверхности ограждающих конструкций

Для расчета R^{av} необходимо знать температуры наружного и внутреннего воздуха, температуру внешней поверхности объекта в реперной точке и сопротивление теплопередаче в реперной точке R^{loc} и массив значений \bar{T}_n^\pm , $n = 1 \dots N$, полученный в результате калибровки термограммы.

Для получения физически корректных результатов проводится компрессия входных данных, заключающаяся в преобразовании входных данных. Действительно, если тепловизионные данные указывают на существование зон поверхности с температурой меньшей температуры внешнего воздуха, то в рамках используемых приближений сопротивление теплопередаче в этих зонах стремиться к бесконечности. Подобные значения указывают на наличие некорректно проведённых измерений, и их следует исключить из рассмотрения.

Введём ограничения на значения коэффициента теплоотдачи $\alpha^{ex} \in (\alpha_{min}^{ex}, \alpha_{max}^{ex})$ и локального сопротивления теплопередаче $R^{loc} \in (R_{min}, R_{max})$. Величины α_{min}^{ex} , α_{max}^{ex} , R_{min} и R_{max} не измеряются и являются параметрами используемой модели, которые устанавливают ограничения на значения величин α^{ex} и R^{loc} . В рамках указанных приближений R^{av} можно рассчитать только в случае, если значения температур внутреннего и внешнего воздуха различаются. Будем считать, что температуры воздуха по обе поверхности ограждающей конструкции постоянны и равны, соответственно, $T^{in|a}$ и $T^{ex|a}$. Для определенности считается, что $T^{in|a} > T^{ex|a}$ (случай $T^{in|a} < T^{ex|a}$ аналогичен рассматриваемому случаю).

Экспериментальные данные, не удовлетворяющие введённым ограничениям, можно выбросить из рассмотрения, либо можно произвести их компрессию. Мы используем второй подход, так как в противном случае можно лишиться слишком большого количества экспериментальных данных. Введём значение температуры T^{loc} , удовлетворяющее перечисленным выше ограничениям в реперной точке. Значение температуры в этой точке T^{loc} рассчитывается по формуле с использованием известных коэффициентов A и B . Определим по правилу диапазон температур реперной точки $\{T_{min}^{loc}, T_{max}^{loc}\}$, обеспечивающий выполнение ограничений в реперной.

$$\{T_{min}^{loc}, T_{max}^{loc}\} = \left[T^{ex|a} + \frac{T^{in|a} - T^{ex|a}}{R^{loc} \alpha_{min}^{ex}}, T^{ex|a} + \frac{T^{in|a} - T^{ex|a}}{R^{loc} \alpha_{max}^{ex}} \right]$$

Определим значение T^{loc} по правилу .

$$T^{loc} = \begin{cases} T_{min}^{loc}, & T^{loc} < T_{min}^{loc} \\ T^{loc}, & T_{min}^{loc} \leq T^{loc} \leq T_{max}^{loc} \\ T_{max}^{loc}, & T^{loc} > T_{max}^{loc} \end{cases}$$

Значение коэффициента теплоотдачи на внешней поверхности объекта определяется следующим соотношением:

$$\alpha^{ex} = \frac{T^{in|a} - T^{ex|a}}{R^{loc} (T^{loc} - T^{ex|a})}$$

При помощи полученного значения α^{ex} по формуле определим диапазон $\{T_{min}, T_{max}\}$, в котором может меняться измеренное значение температуры стены. Введение этого ограничения гарантирует удовлетворение условия $R^{loc} \in [R_{min}, R_{max}]$.

$$\{T_{min}, T_{max}\} = \left[T^{ex|a} + \frac{T^{in|a} - T^{ex|a}}{R_{max} \alpha^{ex}}, T^{ex|a} + \frac{T^{in|a} - T^{ex|a}}{R_{min} \alpha^{ex}} \right]$$

Обозначим измеренные значения температур на поверхности ограждающей конструкции, прошедшие процедуру компрессии, F_n . Получим значения F_n с использованием известных значений T_n^{\pm} по формуле .

$$F_n = \Phi + \Gamma T_n^{\pm}$$

Коэффициенты Φ и Γ должны обеспечивать выполнение условий $T_n^c = \{T_{\min}, T_{\max}\}$ и $T_n^c = \Phi + \Gamma T_n^{loc}$. Этим требованиям удовлетворяют значения .

$$\Phi = \begin{cases} \frac{T_{\min} - T_n^c}{\min\{T_n\} - T_n^{loc}}, & \min\{T_n\} < T_{\min} \\ 1, & \{T_n\} \in [T_{\min}, T_{\max}] \\ \frac{T_{\max} - T_n^c}{\max\{T_n\} - T_n^{loc}}, & \max\{T_n\} > T_{\max} \end{cases}, \quad \Gamma = T_n^c - \Phi T_n^{loc}$$

Термограмма, откалиброванная с учётом компрессии входных данных, представляет собой исходные данные для расчёта приведенного сопротивления теплопередаче. Считая, что каждому пикселю изображения термограммы соответствует некоторая постоянная заданная площадь поверхности исследуемого объекта, несложными математическими преобразованиями из формулы можно получить выражение для приведенного сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции.

$$R^{av} = N \sum_{n=1}^K e^{\alpha \left(\frac{T_n^c - T^{ex|a}}{T^{in|a} - T^{ex|a}} \right)^{-1}}$$

Ограничения метода.

При обработке температурной истории реперной зоны выбранный математический аппарат использует следующие приближения:

1. В процессе ТНК объекта внутри ограждающих конструкций, реализуется одномерный процесс теплопередачи;
2. В момент начала измерений внутри ограждающих конструкций реализуется стационарный процесс теплопередачи;
3. На поверхностях объекта реализуется конвективный процесс теплоотдачи.

Выполнение первого допущения достигается выбором реперной точки в зоне однородного распределения температурного поля на поверхности наружных ограждающих конструкций.

Выполнение второго допущения обеспечивается выбором продолжительности температурной истории: если её продолжительность превышает несколько суток, отличие начального распределения температуры от стационарного практически не сказывается на положении минимумов функционала правдоподобия.

Процесс теплообмена на поверхностях (особенно внешней поверхности) не всегда может рассматриваться как конвективный. Особенно ярко это проявляется при наличии внешних источников тепла, таких как солнце. На этих участках температурной истории процесс теплообмена не описывается используемой в программе физико-математической моделью, их следует исключить из вычислений.

Описание технических и программных средств.

Техническое решение, позволяющее экспериментально определить приведенное сопротивление теплопередаче, включает в себя экспериментальную стадию и стадию обработки полученных на экспериментальной стадии данных. Во время экспериментальной стадии на обследуемом объекте проводятся измерения. Результаты этих измерений обрабатываются разработанным аппаратно-программным комплексом. Относительная погрешность определения приведенного сопротивления теплопередаче наружных

ограждающих конструкций строительных сооружений в реальных условиях их эксплуатации по описанному методу имеет величину не более 15 %.

В рамках описанного метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче многослойной ограждающей конструкции в реальных условиях эксплуатации зданий методом решения обратной задачи теплопроводности, использующей «функционал правдоподобия» на основе конечно-разностной схемы, разработана программа WEMO Building 1.1. Программа реализует алгоритм, создающий стандартный оконный интерфейс пользователя, использующий технологию Windows GUI. С помощью библиотеки Microsoft Foundation Classes реализованы алгоритмы чтения текстовой и двоичной информации с жёсткого диска компьютера, записи текстовой и двоичной информации на жёсткий диск компьютера, алгоритмы отображения графиков и сохранения их в виде графических файлов формата BMP. На языке MathWorks Matlab реализованы вычислительные алгоритмы. Интерфейс системы Matlab реализует алгоритм взаимодействия кода Matlab и исполняемых модулей программы.

В качестве платформы для запуска программы выбраны рабочие станции на основе процессоров стандарта IA-32. Эти рабочие станции получили на момент создания программы широкое распространение во всём мире, что позволяет без каких-либо ограничений использовать программу на современных компьютерах.

В качестве среды функционирования программы выбрано семейство операционных систем Microsoft Windows, предоставляющее разработчику разумный компромисс между стоимостью системы, открытостью стандартов взаимодействия программного, аппаратного обеспечения и платформы и средствами взаимодействия с пользователем. Программа оптимизирована для использования на однопроцессорных рабочих станциях, поэтому выигрыш в производительности, связанный с использованием многопроцессорных систем, будет незначительным.

Для создания входных данных рекомендуется использовать самопишущие датчики температуры и тепловизоры, прошедшие государственную аттестацию, например, ТехноАС ИС-201 и ИРТИС-200/2000.

Технико-экономические показатели

В настоящее время, теплотехнические показатели строительных конструкций определяют по ГОСТ [12]. Метод основан на прямых измерениях температур воздуха внутри помещения и снаружи вблизи испытуемой ограждающей конструкции и определении средней величины теплового потока, протекающего через участок стены, ограниченный измерительным прибором. Метод применим при лабораторных исследованиях, однако, имеет ограниченное применение в натурных условиях эксплуатации зданий, так как может быть использован при минимальных размерах исследуемых фрагментов 2,0 м × 2,0 м. Эта величина складывается из размеров используемого оборудования с добавлением свободной зоны от края испытательного прибора до края исследуемого фрагмента. Согласно требованиям ГОСТ [12] один из линейных размеров обследуемого объекта должен быть больше 0,75 м. При размерах прибора 0,5 м × 0,5 м и ширине свободной зоны, равной тройной толщине ограждающей конструкции, например, для серии КОПЭ – 0,25 м × 3 м, минимальный размер исследуемого фрагмента должен быть 2,0 м × 2,0 м.

На практике обеспечить выполнение этого условия можно только для торцевых стен. Если учесть, что подавляющее большинство современных ограждающих конструкций имеет толщину от 0,35 м до 0,7 м, возможность использования [12] для определения фактического значения приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций ограничена. Используемый одновременно с [12] ГОСТ [13] имеет более широкую область применения по размерам и типам ограждающих конструкций, однако, погрешность определения сопротивления теплопередаче в иных случаях достигает 300 %[14].

Определение энергосберегающих характеристик и тепловых потерь через ограждающие конструкции зданий с высокой эффективностью может производиться на

основе анализа их температурных полей комплексным тепловизионным методом. Это обусловлено тем, что при эксплуатации здания в период отопительного сезона существует температурный напор между внутренним и наружным воздухом, поэтому наличие различных дефектов, повреждений, конструктивных элементов, имеющих отличное от основного материала сопротивление теплопередаче, будут регистрироваться как зоны с аномальными температурами, анализ которых позволяет идентифицировать их по признакам дефект-качество. Определение количественных значений теплотехнических характеристик ограждающих конструкций в реальных условиях их эксплуатации требует проведения измерения температур контактными приборами в течение определенного периода времени, последующем анализе контактных и бесконтактных измерений с использованием физико-математических моделей процесса теплопередачи через контролируемую конструкцию.

В Москве проведение тепловизионных обследований с определением фактических значений приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций согласно МГСН [5] «Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодоснабжению» являются обязательными, что повлияло на повышение качества строительных объектов. Например, качество строительства объектов, сданных в эксплуатацию в 2003 году, улучшилось на 50 % по сравнению с 2000 годом [15].

Для определения фактического состояния характеристик строительных объектов Технологическим институтом «ВЕМО» разработана и внедрена в практику технология комплексного теплового (тепловизионного) обследования зданий и строительных сооружений в реальных условиях их эксплуатации (в летний и зимний периоды) с определением их теплотехнических характеристик.

Технология определения приведенного сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций строительных сооружений в реальных условиях их эксплуатации состоит из:

1. Рекомендации по комплектации аппаратной части аппаратно-программного комплекса, реализующего методику
2. Рекомендаций по установке измерительной аппаратуры
3. Методики измерения температурной истории обследуемого объекта
4. Методики проведения тепловизионного обследования
5. Методики обработки результатов измерений
6. Комплекса аппаратно-программных средств

Технология позволяет определять величину приведенного сопротивления с погрешностью не более 15 %. В её основе лежит решение обратной задачи ТНК в многослойной пространственной области с подобластями, имитирующими дефекты, в условиях нестационарного процесса теплопередачи. Решение обратной задачи основано на сравнении расчетных и экспериментальных данных. Вычисленные значения теплотехнических параметров ограждающей конструкции соответствуют минимальному расхождению экспериментальных и расчётных данных.

Разработанный метод обладает существенным экономическим и техническим эффектом. Ниже перечисленные свойства отличают метод от имеющихся аналогов:

1. Метод позволяет оперативно определять теплотехнические характеристики строительных конструкций;
2. Метод даёт возможность проведения обследования без изменения режима эксплуатации строительной конструкции;
3. Допускается возможность проведения энергетических обследований ограждающих конструкций зданий независимо от отопительного сезона, для проведения энергетических обследований в летний период разработана специальная модификация методики [16];
4. При реализации метода используются современные математические методы обработки данных, позволяющие сократить время проведения обследования с 14 рабочих дней (требуемых согласно ГОСТ [12]) до 5 рабочих дней.

Достоверность и надежность эксплуатации методик подтверждена 4-х летним опытом работы при обследовании более 300 строительных объектов. Разработанные математические методы и требования к аппаратному обеспечению реализованы в виде методик и аппаратно-программных комплексов, использующих стандартные измерительные и вычислительные средства. Созданные методики обеспечивают определение показателей назначения с погрешностью не более 15 %, имеют соответствующие сертификаты Госстандарта РФ и признаны Госэнергонадзором РФ и Минэнерго РФ как базовые для определения качества строительства и эффективности энергосбережения строительных конструкций.

Литература

- 1 Дмитриев А.Н. Управление энергосберегающими инновациями в строительстве зданий: Учебное пособие.- М.: АСВ 2000. – 320 с.
2. Указ Президента РФ от 28 апреля 1997 г. № 425 «О реформе жилищно-коммунального хозяйства в Российской Федерации»
3. СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий»
4. ГОСТ Р 51387. Энергосбережение. Нормативно-методическое обеспечение. Основные положения. Принят и введен в действие Постановлением Госстандарта России от 30 ноября 1999 г., № 485 ст.
5. Московские городские строительные нормы 2.01-99 «Энергосбережение в зданиях. Нормативы по теплозащите и тепловодоснабжению», Москва, 1999.
6. Совместное заседание Совета Безопасности Российской Федерации и президиума Государственного совета Российской Федерации от 24 февраля 2004 года №1
7. Указ Президента Российской Федерации от 9 сентября 2004 года
8. Постановление правительства Москвы от 9 октября 2001 года № 912-ПП «О городской программе по энергосбережению в городе Москве»
9. Решение принято в протоколе №5-2002 заседания пленума от 23 июля 2002 г. «Об утверждении методики диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом»
10. Будадин О. Н., Абрамова Е. В., Слитков М. Н. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом. Свидетельство об аттестации Госстандарта России № 09/442-2001 от 09.07.2001 г., 41 с.
11. O. Lebedev, D. Kirzhanov, V. Avramenko and O. Budadin, THERMAL NONDESTRUCTIVE TESTING OF BUILDINGS IN PRACTICE // Proceedings of 16th WCNDT – 2004, № 609, 1-8.
12. ГОСТ 31166-2003 «Конструкции ограждающие зданий и сооружений. Метод калориметрического определения коэффициента теплопередачи» Стандарт введен в действие с 01 июля 2003 г.
13. ГОСТ 26254-84 «Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций»
- 14 Разработка теплового метода промышленного контроля зданий и строительных сооружений/ О.Н. Будадин, Е.В. Абрамова, Т.Е. Троицкий-Марков, О.В. Лебедев [электронный ресурс]//XVI конференция Неразрушающий контроль и диагностика.- Сборник статей по материалам XVI конференции “Неразрушающий контроль и диагностика”.-СПб, 2002.- 4-3-06.
- 15 Практическая реализация теплового неразрушающего контроля зданий и строительных сооружений/О.Н. Будадин, О.В. Лебедев, Е.В. Абрамова, В.Г. Авраменко, Т.Е. Троицкий–Марков//Сб. докл. 4^{го} Всероссийского с Международным участием научно-практического семинара.-СПб,2004.-С.106-107.
16. Будадин О. Н., Абрамова Е. В., Круторогов О. С. и др. Методика диагностики и энергетических обследований наружных ограждающих конструкций строительных сооружений тепловизионным бесконтактным методом (летний вариант). Свидетельство об аттестации Госстандарта России № 02/442-2002 от 09.08.2002 г., 41 с.