

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ЭТАЛОННОГО СЛОЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

В.Г. Авраменко, О.В. Лебедев, О.Н. Будадин, Д.В. Киржанов

*Технологический институт энергетических исследований, диагностики и неразрушающего
контроля "ВЕМО", Россия, г. Москва, 113162 Люсиновская ул., д.62,*

E-mail: oleg@shg.ru, budadin@tsinet.ru.

Предложен метод определения сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций, основанный на использовании эталонного слоя - дополнительной структуры с заданными теплофизическими характеристиками. Оценена погрешность, связанная с конечными размерами эталонного слоя. Разработан способ существенного упрощения процедуры определения сопротивления теплопередаче по сравнению с методами решения обратных задач, основанными на численном интегрировании уравнения теплопроводности. Предложена возможная конструкция эталонного слоя.

Основной задачей теплового неразрушающего контроля зданий и сооружений является определение теплофизических характеристик материалов, составляющих наружные ограждающие конструкции исследуемых объектов^{1,2,3}. Наиболее важной из определяемых характеристик исследуемого фрагмента наружных ограждающих конструкций является величина его сопротивления теплопередаче. Эта величина определяет теплоизоляционные свойства фрагмента конструкции и связывает плотность теплового потока через выбранный фрагмент конструкций с разностью температур воздуха внутри и снаружи помещения. Именно она показывает то, насколько эффективно в здании сохраняется тепло зимой и насколько медленно здание прогревается летом. В связи с этим, определению сопротивления теплопередаче в статье уделено наибольшее внимание.

Большинство существующих методик определения сопротивления теплопередаче многослойных объектов в реальных условиях эксплуатации основаны на непосредственном измерении плотности теплового потока, проходящего через поверхность фрагмента исследуемой конструкции^{4,5}. Однако современные методики приводят к существенной ошибке определения плотности теплового потока. Появление ошибки связано с существенным различием теплофизических характеристик поверхности фрагмента ограждающих конструкций и материала используемого датчика⁶. Большая погрешность в определении плотности теплового потока приводит к некорректному определению величины сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций.

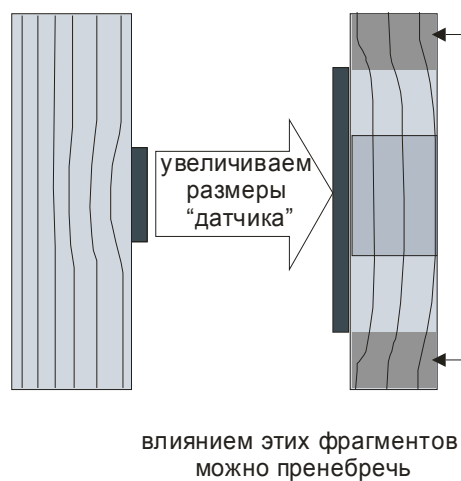


Рис 1. Основная идея метода эталонного слоя

Целью настоящей работы является разработка альтернативного метода определения сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций. В этом методе, с одной стороны, должны быть устранены ошибки, обусловленные некорректной регистрацией плотности теплового потока, а с другой стороны, для достоверного определения теплофизических характеристик исследуемого объекта, должна максимально полно использоваться информация о плотностях тепловых потоках, проходящих через поверхности объекта. Метод должен быть применим как в стационарном (т.е. при постоянных во времени температурах воздуха вблизи поверхностей исследуемого фрагмента), так и в нестационарных температурных режимах. Метод должен обеспечивать приемлемую с практической точки зрения точность определения искомых характеристик объекта⁷.

Основная идея предлагаемого метода заключается в существенном увеличении размеров датчика в плоскости, параллельной поверхности исследуемого фрагмента (рис. 1). Если линейные размеры "датчика" в этой плоскости в несколько раз превышают толщину исследуемого фрагмента, можно пренебречь влиянием других фрагментов ограждающих конструкций и работать в так называемом одномерном приближении, пренебрегая неоднородностью пространственного распределения температурного поля в направлении, параллельном поверхности фрагмента. При этом к фрагменту, фактически, добавляется еще один слой с известными характеристиками. Назовем добавляемую структуру эталонным слоем.

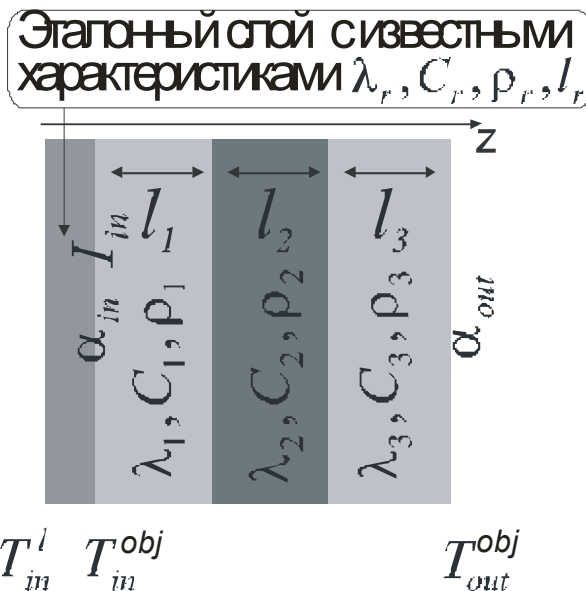


Рис. 2. Принципиальная схема определения теплофизических характеристик материалов фрагмента наружных ограждающих конструкций здания.

Рассмотрим фрагмент наружной ограждающей конструкции здания (рис.2), состоящий из нескольких слоев. Материалы слоев характеризуются толщинами l_i , коэффициентами теплопроводности λ_i , удельными теплоемкостями C_i и плотностями ρ_i . Эти величины, а также коэффициенты теплоотдачи поверхностей граничных слоев необходимо определить в результате процедуры контроля. Прикрепим к внутренней поверхности фрагмента дополнительный слой известной толщины l_r с заданными теплофизическими характеристиками λ_r, C_r и ρ_r . Эту структуру в дальнейшем будем называть эталонным слоем. Для упрощения расчетов предположим, что и фрагмент и эталонный слой имеют бесконечные размеры в плоскости XY (плоскость, перпендикулярная оси Z на рис.2).

Для определения искомых теплофизических параметров фрагмента необходимо измерить температуры поверхностей исследуемого фрагмента T_{in}^{wall} и T_{out}^{wall} , а также температуру поверхности эталонного слоя T_{in}^l , граничащую с воздухом внутри помещения.

Для определения сопротивления теплопередаче фрагмента необходимо решить нестационарное одномерное уравнение теплопроводности⁸

$$\rho_r C_r \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_r \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (1)$$

с известными значениями удельной теплоемкости C_r , плотности ρ_r и коэффициента теплопроводности λ_r эталонного слоя и заданными граничными условиями:

$$\begin{aligned} T(z = z_{in}, t) &= T_{in}^l(t) \\ T(z = z_{out}, t) &= T_{in}^{wall}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

В результате решения уравнения (1)⁹ можно получить величину плотности теплового потока через внутреннюю поверхность фрагмента как функцию времени $I_{in}^m(t)$.

Ту же самую величину плотности теплового потока можно рассчитать другим способом. Для этого необходимо решить нестационарное уравнение теплопроводности

$$\rho(z)C(z)\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(z)\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (3)$$

с кусочно-постоянными величинами плотности $\rho(z)$, удельной теплоемкости $C(z)$ и коэффициента теплопроводности $\lambda(z)$, описывающими теплофизические свойства слоев исследуемого фрагмента.

Для решения этой задачи необходимо задать граничные условия первого рода на поверхностях фрагмента:

$$\begin{aligned} T(z = z_{in}, t) &= T_{in}^{wall}(t) \\ T(z = z_{out}, t) &= T_{out}^{wall}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

При решении уравнения (3) необходимо использовать стандартные условия непрерывности для плотности теплового потока и температуры на границе каких-либо двух слоев, составляющих фрагмент:

$$\begin{aligned} T(0^-, t) &= T(0^+, t) \\ \lambda(0^-)\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{0^-} &= \lambda(0^+)\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_{0^+} \end{aligned} \quad (5)$$

Символ $0^{+,-}$ обозначает точку, соответственно, слева либо справа от границы слоев в непосредственной близости к границе.

В результате решения уравнения теплопроводности можно получить значение плотности потока, проходящего через внутреннюю поверхность фрагмента $I_{in}^c(t, \{p\})$ как функцию времени, набора теплофизических параметров и толщин слоев, составляющих фрагмент, обозначенных здесь через $\{p\}$.

Заметим, что величина плотности потока, проходящего через внутреннюю поверхность фрагмента, уже рассчитана ранее с помощью эталонного слоя. Следовательно, при “правильных” значениях параметров $\{p\}$ достигается совпадение плотностей тепловых потоков $I_{in}^c(t, \{p\})$ и $I_{in}^m(t)$. На практике из-за ошибок измерения температуры и из-за различных неучтенных факторов, невозможно добиться идеального совпадения этих зависимостей, можно достичь лишь их максимальной близости.

Степень близости определяется так называемым функционалом правдоподобия, который представляет собой нормированную на полное время измерения τ_m и квадрат средней плотности потока $(\bar{I}_m^{in})^2$ квадратичную невязку плотностей потоков $I_{in}^c(t, \{p\})$ и $I_{in}^m(t)$, проинтегрированную по всему интервалу времени измерения:

$$\begin{aligned} D(\{p\}) &= \frac{1}{\tau_m (\bar{I}_m^{in})^2} \int_0^{\tau_m} (I_{in}^c(t, \{p\}) - I_{in}^m(t))^2 dt \\ \bar{I}_m^{in} &= \frac{1}{\tau_m} \int_0^{\tau_m} I_{in}^m(t) dt \end{aligned} \quad (6)$$

Здесь τ_m – полное время измерения температурных серий.

Чем меньше значение функционала правдоподобия, тем ближе кривые находятся друг к другу. Следовательно, находя глобальный минимум

функционала правдоподобия, можно рассчитать истинные значения параметров $\{p\}$.

Для определения коэффициентов теплоотдачи поверхностей фрагмента необходимо убрать эталонный слой. Далее необходимо измерить температурные истории воздуха внутри $T_{in}^{air}(t)$ и снаружи фрагмента $T_{out}^{air}(t)$, а также температурные истории поверхностей фрагмента $T_{in}^{wall}(t)$ и $T_{out}^{wall}(t)$. Под температурными историями здесь понимается ряд значений температур, измеренных в последовательные моменты времени. Используя температуры поверхностей фрагмента и зная параметры слоев $\{p\}$, можно проинтегрировать уравнение теплопроводности (3) с граничными условиями (4) и найти величины плотностей тепловых потоков через обе поверхности фрагмента $I_{in}(t)$ и $I_{out}(t)$ как функции времени. Для нахождения значений коэффициентов теплоотдачи (α_{in} и α_{out}) достаточно разделить среднюю плотность теплового потока $\bar{I}_m^{in,out}$ на среднюю разность температур воздуха и поверхности фрагмента:

$$\alpha_{in} = \frac{\tau_m \bar{I}_m^{in}}{\int_0^{\tau_m} (T_{in}^{air}(t) - T_{in}^{wall}(t)) dt}$$

$$\alpha_{out} = \frac{\tau_m \bar{I}_m^{out}}{\int_0^{\tau_m} (T_{in}^{air}(t) - T_{in}^{wall}(t)) dt}$$

$$\bar{I}_m^{in,out} = \frac{1}{\tau_m} \int_0^{\tau_m} I_{in,out}^m(t) dt$$

(7)

Рассмотрим более подробно внутреннюю структуру эталонного слоя (рис.3). Следует заметить, что здесь представлена лишь рекомендуемая структура эталонного слоя. Реальная структура определяется возможностями изготовителя и объектами, для исследования которых используется эталонный слой.

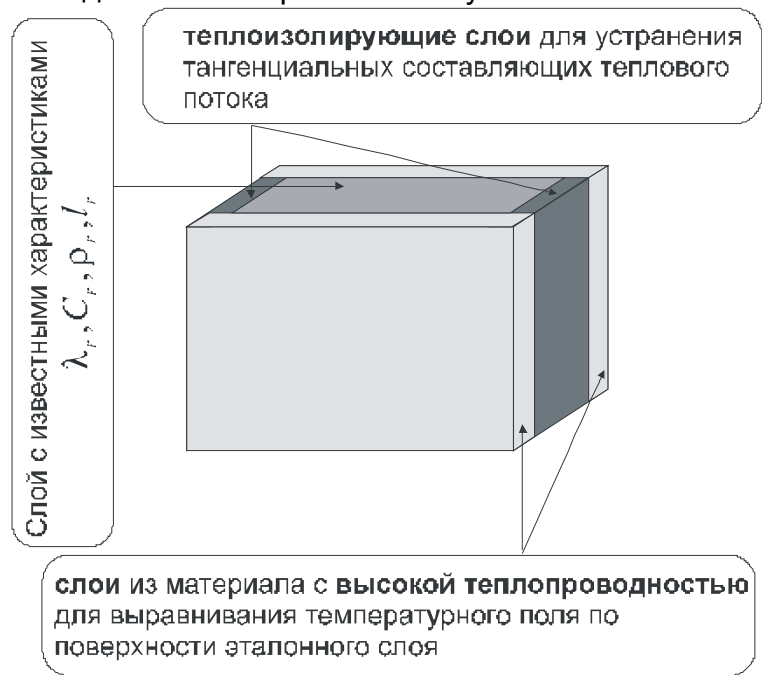


Рис.3. Конструкция эталонного слоя

Основой эталонного слоя является материал с известной толщиной и теплофизическими характеристиками. Слой этого материала должен выбираться достаточно тонким для возможности использования одномерного приближения.

Боковые поверхности слоя заключаются в обкладки из материала с большим сопротивлением теплопередаче. Это необходимо для того, чтобы исключить тангенциальные составляющие плотности теплового потока.

Нормальные поверхности заключаются в обкладки из материала с высокой теплопроводностью для того, чтобы обеспечить выравнивание пространственного распределения температурного поля по поверхности исследуемого фрагмента в области крепления эталонного слоя.

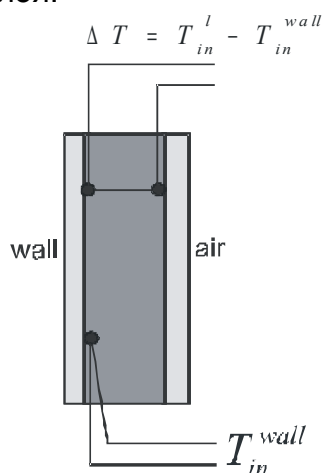


Рис.4. Схема расположения датчиков внутри эталонного слоя

К нормальным поверхностям ближе к центру крепятся два датчика (рис. 4). Первый представляет собой термопару, измеряющую разность температур поверхностей эталонного слоя. Второй датчик измеряет абсолютную температуру поверхности эталонного слоя, которая крепится к исследуемому фрагменту.

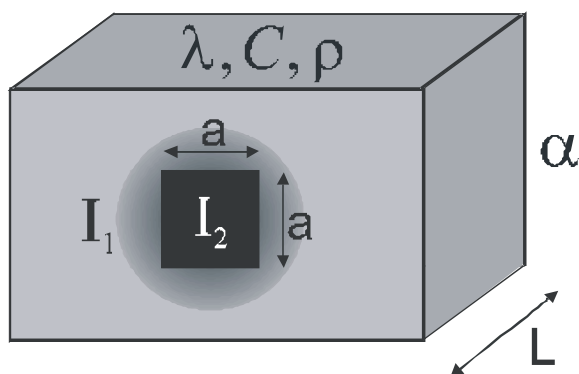


Рис.5. Принципиальная схема определения погрешности метода

Рассмотрим теперь ограничения на размеры эталонного слоя, обеспечивающие применимость предложенного метода. Пусть фрагмент ограждающей конструкции состоит из одного слоя с некоторыми теплофизическими характеристиками: теплоемкостью C , теплопроводностью λ , плотностью ρ и коэффициентом теплоотдачи α на дальней поверхности (т.е. поверхности, противоположной той, на которой закреплен эталонный слой). На ближней поверхности фрагмента закреплен эталонный слой в форме квадрата со стороной a (рис. 5). Будем считать, что плотность теплового потока, проходящего через поверхность объекта в области крепления эталонного слоя, равна I_2 , а вне

эталонного слоя - I_1 . Необходимо определить толщину фрагмента, при которой будет справедливо одномерное приближение.

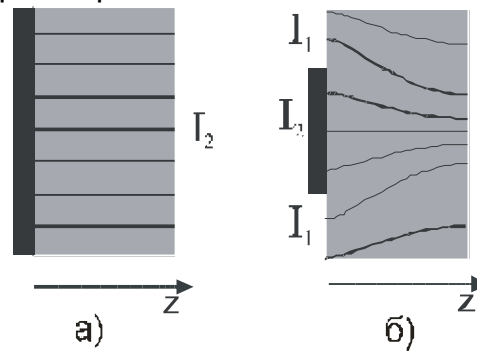


Рис. 6. Поле плотностей тепловых потоков. а) – Идеальный случай эталонного слоя бесконечных размеров. б) – случай эталонного слоя конечных размеров.

В идеальном случае эталонного слоя бесконечных размеров поле плотностей тепловых потоков однородно, и линии теплового потока (т.е. кривые, касательные к которым сонаправлены с вектором плотности теплового потока) направлены перпендикулярно поверхности фрагмента (рис.6.а). Если размеры эталонного слоя конечны, то однородность поля тепловых потоков нарушается (рис.6.б). При этом линии теплового потока “огивают” эталонный слой.

Степень отклонения от одномерного приближения можно характеризовать параметром $\xi(z)$, который определяется следующим выражением:

$$\xi(z) = \left| \frac{I_z(z) - I_2}{I_2} \right| \quad (7)$$

Чем меньше параметр $\xi(z)$, тем более оправдано одномерное приближение. Здесь $I_z(z)$ – z -компонента вектора плотности теплового потока. В идеальном случае датчика бесконечных размеров $I_z(z) = I_2$, поэтому $\xi(z) = 0$. В дальнейшем расчетах будем предполагать, что I_1 в два раза больше I_2 . При этом в области, где эталонный слой не влияет на температурное поле, $\xi(z) = \frac{I_1 - I_2}{I_2} = 1$. Вообще, величина ξ приблизительно равна относительной ошибке определения сопротивления теплопередаче фрагмента в стационарном температурном режиме.

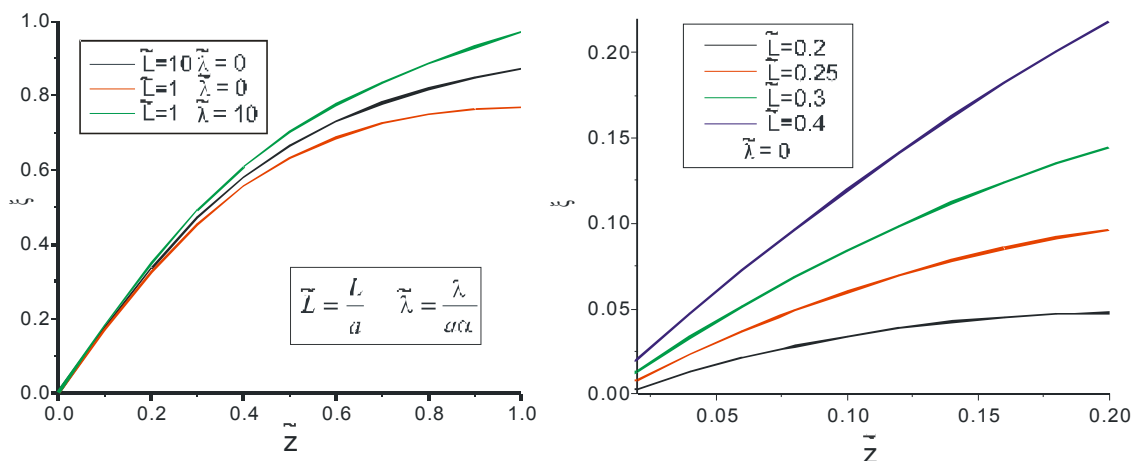


Рис. 7. График функции $\xi(z)$, построенные при различных значениях параметров \tilde{L} и $\tilde{\lambda}$..

Результаты расчетов функции $\xi(z)$ представлены на рис 7. Оказывается, что если толщина объекта больше размера эталонного слоя, одномерное приближение неприменимо уже при $z \sim \frac{1}{3}a$. При этом ошибка определения сопротивления теплопередаче достигает 50%. На левом графике приведены зависимости $\xi(z)$ для разных толщин фрагмента ($L = 10a$ и $L = a$) и разных значениях приведенного коэффициента теплопроводности фрагмента $\tilde{\lambda}$.

Решение оказывается весьма чувствительным к толщине объекта L . На правом графике построены зависимости $\xi(z)$ для разных толщин объекта L . Из графиков видно, что ошибка, возникающая при использовании одномерного приближения на расстоянии $z = 0.2a$, уменьшается с 25% до 5% при уменьшении толщины объекта, соответственно, с $0.4a$ до $0.2a$. Из построенных зависимостей следует, что для расчета сопротивления теплопередаче с ошибкой, меньшей 10%, необходимо использовать эталонный слой с линейными размерами, в 4-5 раз превышающими толщину стены.

В предыдущих расчетах предполагалось численное интегрирование уравнения теплопроводности¹⁰ в объеме фрагмента ограждающей конструкции. Теперь рассмотрим альтернативный способ расчета и минимизации функционала правдоподобия.

Для простоты расчетов рассмотрим фрагмент конструкции, состоящий лишь из одного слоя толщины l , материал которого характеризуется коэффициентом теплопроводности λ , удельной теплоемкостью C и плотностью ρ . Прикрепим эталонный слой к внутренней поверхности фрагмента.

Зная температурные истории на границах эталонного слоя и решая нестационарное уравнение теплопроводности, можно рассчитать плотность теплового потока, проходящего через внутреннюю поверхность фрагмента исследуемого объекта, $I_{in}^m(t)$ как функцию времени. Разложим эту зависимость в ряд Фурье на отрезке τ_{av} , равном полному времени измерения:

$$I_{in}^m(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_{in}^m(\omega_n) \exp(-i\omega_n t) \quad (8)$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{\tau_{av}} n$$

Далее, раскладывая в ряд Фурье временные зависимости температур поверхностей фрагмента,

$$T_{in,out}^{wall}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} T_{in,out}^{wall}(\omega_n) \exp(-i\omega_n t) \quad (9)$$

можно рассчитать величину плотности теплового потока, проходящего через внутреннюю поверхность фрагмента, как функцию времени и набора параметров $\{P\}$:

$$I_{in}^c(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_{in}^c(\omega_n, \{P\}, T_{in,out}^{wall}(\omega_n)) \exp(-i\omega_n t) \quad (10)$$

Заметим, что амплитуды Фурье-гармоник можно рассчитать аналитически. В частности, для фрагмента однослойной ограждающей конструкции амплитуды Фурье-гармоник описываются следующей формулой:

$$I_{in}^c(\omega_n, \{P\}) = \frac{\lambda}{l} \left(T_{in}^{wall}(\omega_n) \frac{k_n l}{\tanh k_n l} - T_{out}^{wall}(\omega_n) \frac{k_n l}{\sinh k_n l} \right) \quad (11)$$

$$k_n = \frac{1-i}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\omega_n C \rho}{\lambda}}$$

Минимизация функционала правдоподобия при этом сводится к минимизации суммы квадратов разностей Фурье-гармоник:

$$D(\{p\}) = \frac{1}{(\bar{I}_m^{in})^2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} |I_{in}^c(\omega_n, \{p\}) - I_{in}^m(\omega_n)|^2 \quad (12)$$

Представление функционала правдоподобия в виде (12) дает достаточно широкие возможности для анализа. Действительно, как видно из формулы (10), высокочастотные слагаемые ($k_n l \gg 1$) зависят лишь от свойств малой области фрагмента вблизи его внутренней поверхности и не содержат интегральной информации о фрагменте.

Для расчета сопротивления теплопередаче фрагмента, то из всей суммы (12) следует оставить лишь низкочастотные члены, которые удовлетворяют следующему условию:

$$|1 - \tanh k_n l| \ll 1 \quad (13)$$

Как следует из (11), единственным параметром структуры, от которого зависят низкочастотные Фурье-гармоники плотности теплового потока, является сопротивление теплопередаче объекта. Следовательно, минимизация низкочастотных членов функционала правдоподобия позволяет найти искомое сопротивление теплопередаче исследуемого объекта.

Заключение

Таким образом, разработан метод эталонного слоя, позволяющий определять теплофизические характеристики материалов наружных ограждающих конструкций зданий и строительных сооружений. Искомые характеристики исследуемого фрагмента ограждающих конструкций рассчитываются на основе процедуры минимизации функционала правдоподобия. Метод эталонного слоя существенно основывается на предположении об одномерном характере процесса теплопередачи внутри фрагмента, поэтому метод применим при условии, что линейные размеры эталонного слоя в плоскости, параллельной поверхности фрагмента, более чем в 4 раза превосходят толщину исследуемого фрагмента ограждающих конструкций. Использование частотного анализа функционала правдоподобия значительно уменьшает время расчетов и повышает достоверность определения сопротивления теплопередаче фрагмента. В статье предложена возможная конструкция эталонного слоя. Практическое использование метода эталонного слоя позволяет обеспечить высокую достоверность определения теплофизических характеристик материалов наружных ограждающих конструкций зданий и строительных сооружений.

- ¹Будадин О.Н., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В., Сучков В.И. Патент на изобретение № 2151388. Способ неразрушающего контроля качества объекта.
- ² Будадин О.Н., Троицкий-Марков Т.Е., Абрамова Е.В., Сучков В.И. Патент на изобретение № 2162597. Устройство для неразрушающего контроля качества объекта.
- ³ Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. и др. Тепловой метод неразрушающего контроля изделий. – М., Наука, 2002, 476С.
- ⁴ Будадин О.Н., Абрамова Е.В., Лебедев О.В., Родин М.А. Аппаратура теплового неразрушающего контроля и определения теплотехнических характеристик зданий и строительных сооружений – Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века - №9(44), 2002г.
- ⁵ ГОСТ 25380-82 Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции. Утвержден и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 14 июня 1982 г. № 182.
- ⁶ Graaf F. van der. Heat Flux Sensors – A comprehensive series, Volume 4, Chapter 8, VCH Verlagsgesellschaft, Germany, 1989.
- ⁷ ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Введен постановлением Государственным комитетом СССР по делам строительства от 2.08.1984г. № 127, срок введения установлен с 01.01.85г. УДК 624.01.001.4:006.354.
- ⁸ Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е. – М.: Энергия, 1977.
- ⁹ Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики.- М.: Наука, 1977.
- ¹⁰ Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002 г.