УДК 697.112.3:620.179.11

К ВОПРОСУ ДИАГНОСТИКИ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НАРУЖНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

Акад. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. ХРУСТАЛЕВ Б. М.,
канд. техн. наук, проф. АКЕЛЬЕВ В. Д., канд. техн. наук, доц. СИЗОВ В. Д.,
инж. ЗОЛОТАРЕВА И. М.

Белорусский национальный технический университет

Для оценки качества ограждающих конструкций гражданских и промышленных зданий применяются оперативные методы контроля, с помощью которых определяют теплотехнические характеристики. К ним в первую очередь можно отнести бесконтактный метод измерений. В его основе лежат взаимодействие чувствительного элемента контролирующего прибора с объектом измерений, а также тепловизор или компьютерный термограф, запись и обработка данных замеров в которых осуществляются с помощью переносного компьютера. Обычно применение этих методов ограничивается измерением температурных полей. Вопросы же анализа тепловых потоков, сопротивлений теплопроводности, теплопередаче остаются нерешенными.

Сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций $R_{0\text{эксп}}$ в локальных участках характеризуются в соответствии с известными соотношениями:

$$R_{\text{эксп}} = \frac{t_{\infty,1} - t_{\infty,2}}{q_{\text{эксп}}}; \tag{1}$$

$$q_{\text{эксп}} = \sum \frac{q_{i,\text{эксп}}}{N_i}, \tag{2}$$

где $q_{\text{эксп}}$ – удельный тепловой поток в локальных участках, Вт/м^2; N_i – число измерений; $t_{\infty,1}$, $t_{\infty,2}$ – температуры воздуха в отапливаемых помещениях и наружного воздуха, °С.

В то же время

$$R_0 = \frac{t_{\infty,1} - t_{\infty,2}}{q} = R_1 + R_2 + R_3, \tag{3}$$

где q – удельный тепловой поток, Вт/м^2; $R_1 = \frac{1}{\alpha_1}$ – сопротивление теплоотдаче у внутренней поверхности ограждения, м^2·К/Вт; $R_2 = \frac{1}{\alpha_2}$ – то же у наружной поверхности, м^2·К/Вт; $R_3 = \frac{\delta}{\lambda}$ – сопротивление теплопроводности ограждения, м^2·К/Вт.

Так как α_1 с течением времени мало изменяется, величина R_1 = = 0,115 м^2·К/Вт, как правило, составляет не более 10 % от общего сопротивления теплопередаче R_0.

В то же время использование бесконтактных, например тепловизионных, методов позволяет определить интегральные и локальные температуры внутренней ($t_{0,1}$) и наружной ($t_{0,2}$) поверхностей ограждающей конструкции, температуры в плоскостях расположения утеплителя или в области деформированных участков ограждения. Сопротивление теплопроводности ограждения R_3 в них является более значимым для оценки термореабилитации. Несмотря на то, что экспериментальное значение сопротивления теплопередаче может соответствовать нормируемому, это не является показателем комфортных условий в помещении, так как R_0 зависит от α_2, который даже при малой скорости ветра увеличивается, а R_2 – уменьшается. При этом сопротивление теплопередаче R_0, уменьшаясь, стремится к $R_1 + R_3$.

Известно, что коэффициент теплопроводности строительных материалов с уменьшением температуры снижается (диэлектрики), термическое сопротивление возрастает, а увлажнение стены и кристаллизация воды приводят к увеличению коэффициента теплопроводности.

Термическое сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций при контактных и бесконтактных измерениях их температурных полей определяется в соответствии с методиками, изложенными в [1–3].

В отличие от известных инженерно-технических методик [1–3] предлагаемая методика определения сопротивлений теплопередаче ограждающих конструкций при контактных и бесконтактных измерениях температурных полей основана на следующем:

- температуры массопотоков в отапливаемых помещениях с течением времени изменяются интенсивнее относительно температур внутренних поверхностей ограждений в пределах разрешающих значений используемых измерительных приборов за весь временной цикл обследования объекта;
- амплитуды температур наружных поверхностей ограждений вследствие флюктуаций ветра, температур рассеянных и прямых радиационных потоков – величины переменные, теплообмен происходит между поверхностью и окружающим воздухом по закону Ньютона – Рихмана;
- наружное ограждение – это полуограниченное тело при граничных условиях третьего рода.

Как известно, замена условий однозначности для неограниченной пластины, которые обычно используются при теплотехнических расчетах наружных ограждений, основана на принципе эквивалентности, когда при реконструкции геометрических характеристик системы не происходит изменения температур.

В то же время если источники теплоты на границах системы или внутри за определенный интервал времени не оказывают существенного влияния на рассчитываемую температуру точки или области систем, то источники теплоты и некоторые части в ней могут быть исключены из рассмотрения. Эти границы в отличие от других, активно влияющих на его тепловое состояние, рассматриваются как пассивные. При этом возможны следующие варианты трансформации объема: пассивная граница перемещается к рассчитываемой области на расстояние, которое меньше расстояния по сравнению с активной, т. е. она может иметь более удобную для расчета форму, или граница перемещается на некоторое расстояние от рассчитываемой области, или в бесконечность и исключается из рассмотрения. Отметим, что граница рассматривается как пассивная, если температуры и градиент температур на ее поверхности за расчетный интервал времени неизменны.

Например, если в полуограниченном теле внешний источник теплоты в расчетном интервале времени вызывает флюктуации теплового состояния на расстоянии $x \le x_i$, то пассивная граница – это поверхность, расположенная до $x \le x_i$. Если же в неограниченной пластине тепловые условия на одной из поверхностей равны начальным, то пластина рассматривается как полуограниченное тело.

Значит, при обследованиях с использованием контактных и бесконтактных методов, когда продолжительность измерений температурных полей одного (любого) из фрагментов внешних ограждений с термическим сопротивлением теплопередаче R_0 = 1–2,5 м^2·К/Вт не превышает 6 ч, его можно рассматривать как полуограниченное тело. Анализ физико-математических моделей [4–6] показал, что наиболее корректными для данной задачи являются граничные условия III рода, когда известна температура наружного воздуха у поверхности стены. Закон теплообмена между ними и поверхностью

$$-\lambda \left.\frac{\partial t}{\partial x}\right|_{x=0} = \alpha\left(t_{0,2} - t_{\infty,2}\right), \qquad (4)$$

где $t_{\infty,2}$ – температура воздуха; $t_{0,2}$ – то же поверхности; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К).

Начальные условия заключаются в заданном температурном поле ограждения в какой-то момент времени $(\tau = 0)$. Последующие временные интервалы отсчитываются от начальных условий.

Для полуограниченного тела при граничных условиях третьего рода безразмерная температура является функцией теплофизических характеристик ограждения, продолжительности измерений и коэффициента теплоотдачи у внешней поверхности $\bar{\alpha}$:

$$\frac{t(0,\tau)-t(0,0)}{t_{\infty,2}-t(0,0)}=1-\exp\left(\frac{\bar{\alpha}^2}{\lambda_{эк}^2}a_{эк}\tau\right)\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{\bar{\alpha}}{\lambda_{эк}}\right)\right]\sqrt{a_{эк}\tau}, \qquad (5)$$

где $t(0,\tau)$ – температура внешней поверхности ограждения в момент времени τ измерений (1, 2, 3 ч), °С; $t(0,0)$ – то же в начальный момент времени ($\tau = 0$); $t_{\infty,2}$ – средняя температура наружного воздуха во время измерений; °С; $\bar{\alpha}$ – среднее значение коэффициента теплоотдачи у внешней поверхности обследуемого объекта; $\lambda_{эк}$, $a_{эк}$ – эквивалентные коэффициенты тепло- и температуропроводности материалов наружного ограждения, Вт/(м·К), м^2/с.

При этом сопротивление теплопроводности ограждения может быть определено с использованием уравнения (5), в котором $\lambda_{эк}$ выражено через термические сопротивления теплопроводности, а коэффициент температуропроводности – через $\lambda_{эк}$, $c_{эк}$, $\rho_{эк}$.

В уравнении (5) при экспериментальных измерениях известными величинами являются $t(0,\tau)$, $t(0,0)$, $t_{\infty,2}$, τ, а искомыми – $\bar{\alpha}$, R_0 ($\bar{\alpha}$ у поверхностей обследуемого ограждения и реальные его теплофизические характеристики).

Эквивалентные теплофизические характеристики можно рассчитать следующим образом:

$$\lambda_{эк}=\frac{\sum\delta_i}{R_{эк}}; \qquad (6)$$

$$c_{эк}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\delta_i}{\sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{c_i}}; \qquad (7)$$

$$a_{эк}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\delta_i}{\sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{a_i}}; \qquad (8)$$

$$a_{эк}=\frac{\sum_{i=1}^{n}\delta_i}{\sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i c_i \rho_i}{\lambda_{i,эк}}}, \qquad (9)$$

где δ_i – толщина i-го слоя ограждения, поэтому $\delta=\Sigma\delta_i$, м; λ_i – коэффициент теплопроводности i-го слоя ограждения, Вт/(м·К); c_i – массовая удельная теплоемкость i-го слоя ограждения, Дж/(кг·К); ρ_i – плотность i-го слоя ограждения, кг/м^3; a_i – коэффициент температуропроводности i-го слоя ограждения, м^2/с.

С учетом (6)–(9) уравнение (5) можно представить в виде

$$\frac{t(0,\tau)-t(0,0)}{t_{\infty,2}-t(0,0)}=1-\exp\left(\frac{\overline{\alpha}^2}{\delta}\frac{R_{\text{эк}}}{c_{\text{эк}}}\frac{\tau}{\rho_{\text{эк}}}\right)\left[1-\operatorname{erf}\left(\frac{\overline{\alpha}R_{\text{эк}}^{0,5}}{\left(\sum\delta_i\right)^{0,5}}\frac{\tau^{0,5}}{\left(c_{\text{эк}}\rho_{\text{эк}}\right)^{0,5}}\right)\right]=$$

$$=1-\exp\left(\frac{\overline{\alpha}^2}{\delta}\frac{R_{\text{эк}}}{c_{\text{эк}}\rho_{\text{эк}}}\right)\left[1-\operatorname{erf}\left(\overline{a}_{\text{эк}}\sqrt{\frac{\tau R_{\text{эк}}}{\sum\delta_i c_{\text{эк}}\rho_{\text{эк}}}}\right)\right], \qquad (10)$$

где $R_{\text{эк}}=\dfrac{\sum_{i=1}^{n}\delta_i}{\sum_{i=1}^{n}\dfrac{\delta_i}{R_{\text{эк}}}}$ – эквивалентное сопротивление теплопроводности ограждения, в котором от 1 до n слоев, м^2·К/Вт; $\operatorname{erf}(x)$ – интеграл ошибок Гаусса (функция ошибок Гаусса).

В выражении (10) $\overline{\alpha}$ – суммарный коэффициент теплоотдачи,

$$\overline{\alpha} = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}},$$

где $\alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}$ – конвективный и радиационный коэффициенты теплоотдачи, Вт/(м^2·К).

Конвективный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{к}}$ рассчитывается из критериальных зависимостей для конвективного теплообмена в неограниченном пространстве и у вертикально расположенных пластин в зависимости от температур наружных поверхностей и наружного воздуха, скорости ветра, расстояния поверхностей от уровня земли.

Радиационный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{л}}$ зависит от температур поверхностей анализируемого фрагмента, земли у основания здания, небосвода, угловых коэффициентов, их радиационных характеристик. Угловые коэффициенты излучения при расчете $\alpha_{\text{л}}$ находятся из графических или аналитических зависимостей.

Так как численные значения термических сопротивлений теплопроводности наружной стены $R_{\text{эк}}$ при контактных и бесконтактных измерениях рассчитываются из (10) и определяются комплексом, в который входят α, $t(0, \tau)$, $t_{\infty,2}$, зависящие от времени, поэтому, имея группу экспериментальных (натурных) данных и расчетных коэффициентов теплоотдачи у наружной поверхности, можно провести графическую, аналитическую обработку опытных и расчетных характеристик. Коррекция этих зависимостей при любой форме обработки (компьютерная, табличная, графическая и т. д.) необходима для нахождения того значения $R_{\text{эк}}$, которое в минимальной степени зависит от комплекса характеристик: времени измерения, температуры наружной поверхности, наружного воздуха, скорости ветра и т. д.

Изложенное выше можно представить на примере диагностики термического сопротивления теплопроводности наружной ограждающей конструкции здания.

В результате проведенных замеров температур внешней поверхности ограждения, наружного воздуха в течение четырех часов получены значения исходных данных и величины коэффициентов теплоотдачи, рассчитанные по известным соотношениям (табл. 1).

Таблица 1

№ измерения	Время измерения τ, с	$t(0, 0)$,°C	$t(0, \tau)$,°C	$t_{\infty,\tau}$, °C	$\bar{\alpha}$, Вт/(м^2·°C)
1	3600	–1,8	–3,8	–4,8	10,0
2	7200	–1,8	–3,6	–4,25	9,0
3	10800	–1,8	–3,5	–3,9	11,0
4	14400	–1,8	–3,5	–3,9	11,0

Необходимо определить термическое сопротивление теплопроводности наружного ограждения толщиной δ = 0,27 м, исходя из следующих начальных данных. Средняя (эквивалентная) массовая изобарная теплоемкость ограждения c = 1023 Дж/(кг·К), средняя (эквивалентная) плотность слоев ограждения ρ = 1683 кг/м^3.

Для определения термического сопротивления воспользуемся уравнением (5), и методом последовательных приближений добиваемся равенства левой и правой частей.

1. При τ = 3600 с:

1.1. R = 3,0 м^2·К/Вт $1-\exp(2,32)\left[1-\operatorname{erf}(1,5235)\right]=0,681$,

$0,667 \neq 0,681$;

1.2. R = 2,0 м^2·К/Вт $0,667=1-\exp(1,547)\left[1-\operatorname{erf}(1,244)\right]=0,6309$,

$0,667 \neq 0,6309$;

1.3. R = 2,5 м^2·К/Вт $0,667=1-\exp(1,936)\left[1-\operatorname{erf}(1,391)\right]=0,65987$,

$0,667 \neq 0,65987$;

1.4. R = 2,68 м^2·К/Вт $0,667=1-\exp(2,075)\left[1-\operatorname{erf}(1,440)\right]=0,668$,

$0,667 \approx 0,668$;

2. При τ = 7200 с:

2.1. R = 3,0 м^2·К/Вт $0,735=1-\exp(3,76)\left[1-\operatorname{erf}(1,94)\right]=0,739$,

$0,735 \neq 0,739$;

2.2. R = 2,5 м^2·К/Вт $0,735=1-\exp(3,13)\left[1-\operatorname{erf}(1,77)\right]=0,72$,

$0,735 \neq 0,72$;

2.3. R = 2,7 м^2·К/Вт $0,735=1-\exp(3,387)\left[1-\operatorname{erf}(1,840)\right]=0,732$,

$0,735 \approx 0,732$;

3. При τ = 10800 с:

3.1. R = 3,0 м^2·К/Вт $0,809=1-\exp(8,4256)\left[1-\operatorname{erf}(2,9)\right]=0,812$,

$0,809 \neq 0,812$;

3.2. R = 2,5 м^2·К/Вт $0,809=1-\exp(7,02)\left[1-\operatorname{erf}(2,65)\right]=0,777$,

$0,809 \neq 0,78$;

3.3. R = 2,69 м^2·К/Вт $0{,}809 = 1 - \exp(7{,}555)\left[1 - \mathrm{erf}\,(2{,}75)\right] = 0{,}806$,

$0{,}809 \approx 0{,}806$;

4. При τ = 14400 с:

4.1. R = 3 м^2·К/Вт $0{,}809 = 1 - \exp(11{,}234)\left[1 - \mathrm{erf}\,(3{,}352)\right] = 0{,}974$,

$0{,}809 \neq 0{,}974$;

4.2. R = 2,5 м^2·К/Вт $0{,}809 = 1 - \exp(9{,}36117)\left[1 - \mathrm{erf}\,(3{,}06)\right] = 0{,}801$,

$0{,}809 \neq 0{,}801$;

4.3. R = 2,71 м^2·К/Вт $0{,}809 = 1 - \exp(10{,}148)\left[1 - \mathrm{erf}\,(3{,}186)\right] = 0{,}8085$,

$0{,}809 \approx 0{,}8085$.

По полученным значениям $R_{эк}$, м^2·К/Вт, в различные интервалы времени можно построить графическую зависимость $R_{эк} = f(\tau)$.

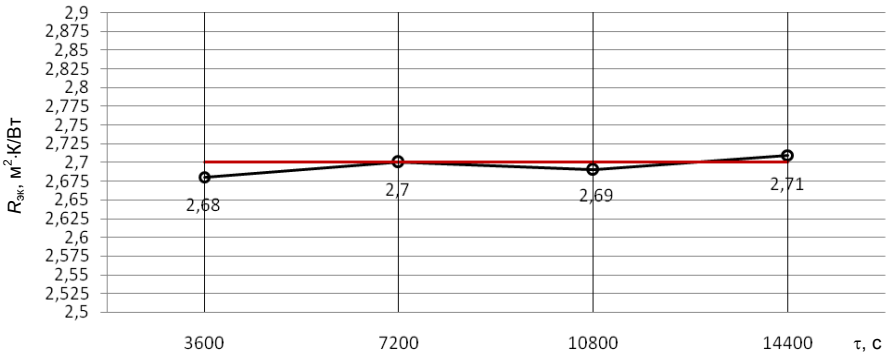

Рис. 1

Приведенная зависимость свидетельствует о том, что полученные методом последовательных приближений величины термического сопротивления по выражению (5) не отклоняются от среднего значения R = = 2,695 м^2·К/Вт в пределах 1–2 %. Это показывает адекватность расчетных значений результатам натурных обследований, и для определения $R_{эк}$ можно пользоваться уравнением (5), связывающим относительную избыточную температуру, коэффициент теплоотдачи у внешней поверхности и температуропроводность материалов ограждения для полуограниченного тела при граничных условиях III рода.

В Ы В О Д Ы

1. Физико-математическая модель теплопереноса в наружных ограждающих конструкциях при проведении натурных исследований дает основание рассматривать их не как неограниченную пластину, а как полуограниченное тело при граничных условиях III рода, что позволяет более точно определить искомую величину.

2. Представленная методика определения термического сопротивления теплопроводности ограждений основана на измерениях температур внешней поверхности, окружающей среды в различные интервалы времени, аналитических расчетах температурного поля из уравнений, связы-

вающих относительную избыточную температуру, коэффициент теплоотдачи у внешней поверхности и температуропроводность материалов ограждения, используемых для расчета тел при граничных условиях III рода. Это подтверждается примером расчета, который показывает адекватность расчетных зависимостей термических сопротивлений экспериментальным результатам при определении сопротивления теплопроводности, полученного методом последовательных приближений.

ЛИТЕРАТУРА

1. З д а н и я и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций: ГОСТ 26254–84. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – С. 1–24.

2. М е т о д тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций: ГОСТ 26629–85. – Введ. 01.07.1986.

3. В р е м е н н ы й порядок измерительного контроля здания и сооружений на соответствие сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций нормативным требованиям // Строительный рынок. – 2003. – № 9. – С. 10–13.

4. Л ы к о в, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.

5. П е х о в и ч, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л.: Энергия, 1976. – 352 с.

6. Х р у с т а л е в, Б. М. Тепло- и массообмен / Б. М. Хрусталев. – Минск: БНТУ, 2007. – 606 с.

Представлена кафедрой
теплогазоснабжения и вентиляции

Поступила 05.05.2010

УДК 621.1

РАСЧЕТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТЕНКИ ПРИ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЯХ

Докт. техн. наук, проф. ЕСЬМАН Р. И.

Белорусский национальный технический университет

В специальных технологиях получения тонкостенных композиционных материалов значительный интерес представляют процессы нестационарного теплопереноса в многослойных стенках, имеющие нелинейный характер. При этом необходимо учитывать несимметричные условия теплообмена на поверхностях многослойной стенки, отдельные слои могут претерпевать фазовые превращения: плавление, затвердевание, сублимацию, испарение и т. д. Такие задачи приходится решать при подплавлении теплозащитных покрытий космических аппаратов, в процессах лазерной и плазменной обработки литых изделий с использованием эффекта скоростного затвердевания, при получении тонкостенных литых конструкций на подвижных кристаллизаторах.

Постановка задачи состоит в следующем. Рассмотрим элемент тонкостенной плоской заготовки прямоугольного сечения. Задачу решаем в дву-