

ISSN 0204-3602

# ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

ТОМ 33

6



2011

INDUSTRIAL HEAT ENGINEERING

Vol. 33

№ 6 2011

УДК 536.3:536.6:691.624

Бурова З.А.<sup>1</sup>, Декуша Л.В.<sup>1</sup>, Воробьев Л.И.<sup>1</sup>, Мазуренко А.Г.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

<sup>2</sup>Национальный университет пищевых технологий

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ЭМИССИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СТЕКОЛ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Розроблено методику для визначення коефіцієнта емісії енергозберігаючих стекол та покриттів калориметричним методом з використанням установки ИТ-7С, виготовленої за ДСТУ ISO 8301:2007.

Разработана методика для определения коэффициента эмиссии энергосберегающих стекол и покрытий калориметрическим методом с использованием установки ИТ-7С, изготовленной по ДСТУ ISO 8301:2007.

A method for determination of emission coefficient of energysaving glasses and coverages by calorimetric method with the use of device ИТ-7С, which made in accordance with ДСТУ ISO 8301:2007, is developed.

$D$  – диаметр, м;  
 $h$  – толщина, м;  
 $H$  – расстояние, м;  
 $T$  – температура, К;  
 $R$  – коэффициент отражения;  
 $F$  – площадь, м<sup>2</sup>;  
 $q$  – поверхностная плотность теплового потока, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $\epsilon$  – коэффициент эмиссии поверхности;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;  
 $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).  
**Индексы нижние:**  
 $n$  – нормальный;

возд – воздух;  
 обр – образец;  
 пр – приведенный;  
 пок – покрытие;  
 ср – средний;  
 ст – стекло;  
 рад – радиационный;  
 нагр – нагреватель;  
 хол – холодильник.

### Сокращения:

ИК – инфракрасный;  
 ПТП – преобразователь теплового потока;  
 ТРХ – терморadiационные характеристики.

Потери тепловой энергии сквозь светопрозрачные ограждающие конструкции зданий и сооружений составляют, по разным оценкам, от 40 до 50 %. Основными составляющими таких теплопотерь являются:

- Кондуктивно-конвективная – обусловлена тепловым сопротивлением стеклопакета и параметрами воздушных прослоек в нем. Снижение этой составляющей добиваются увеличением количества камер, а также герметизацией внутреннего пространства стеклопакета.
- Радиационная (до 70 %) – потери тепловой энергии в виде электромагнитного излучения через прозрачные ограждающие конструкции. Основным способом их уменьшения является использование низкоэмиссионного

(Low-E) стекла.

На сегодняшний день существуют два вида низкоэмиссионных покрытий: так называемое k-стекло (Low-E) – "твердое" покрытие – и i-стекло (Double Low-E) – "мягкое" покрытие. Они отличаются не только технологией нанесения, но и эксплуатационными характеристиками, к числу которых принадлежат теплофизические, механические и экономические параметры. Твердое покрытие обладает меньшей эффективностью и большей стоимостью, но оно прочнее мягкого, а также имеет определенные технологические преимущества.

Основным параметром, определяющим энергоэффективность светопрозрачной конструкции, является коэффициент эмиссии стек-

ла, характеризующий его способность переизлучать теплоту в инфракрасном диапазоне длин волн. Коэффициент эмиссии поверхности обычного стекла составляет 0,837, а стекла с низкоэмиссионным покрытием – меньше 0,04.

Главным применением стекол является их использование в составе стеклопакетов, теплосберегающие свойства которых во многом определяются параметрами покрытия. Преимущества применения энергосберегающих стекол:

- однокамерный стеклопакет с любым (*k*-стекло, *i*-стекло) низкоэмиссионным стеклом обладает большим эффектом энергосбережения, чем двухкамерный стеклопакет с обычными стеклами;
- однокамерный стеклопакет с энергосберегающим стеклом легче двухкамерного на 10 кг/м<sup>2</sup> (при толщине стекла 4 мм), что обеспечивает более продолжительный срок эксплуатации оконного переплета и уменьшает нагрузку на оконную фурнитуру;
- однокамерный стеклопакет с низкоэмиссионным стеклом имеет большее светопропускание, чем двухкамерный с обычными стеклами;
- при массовом производстве цена однокамерного стеклопакета с одним энергосберегающим стеклом практически не отличается от цены двухкамерного с обычными стеклами.

В Украине применяют низкоэмиссионное стекло как отечественного, так и зарубежного производства, причем отсутствие на данный момент единой методики определения терморadiационных характеристик энергоэффективных стекол и покрытий приводит к расхождениям в определении их свойств, а кое-где и к целенаправленному декларированию высококачественных характеристик с целью рекламы в сугубо коммерческих целях.

Известные методы и приборы для измерения ТРХ предназначены, как правило, для работы в видимом и ближнем ИК-диапазоне, что ограничивает их широкое применение для измерения теплозащитных характеристик энергоэффективных стекол и покрытий. В на-

стоящее время в Украине действует ряд нормативных документов [1 – 5] по определению теплофизических характеристик и тепловым расчетам светопрозрачных конструкций. В этих стандартах регламентирована методика определения ТРХ энергоэффективных стекол оптическим способом. Согласно данной методике для 30 рекомендованных значений длины волны ( $\lambda$ ) в диапазоне от 5,5 до 50,0 мкм с применением специализированного прибора – ИК-спектрофотометра Фурье измеряют спектральные коэффициенты отражения при средней температуре 283 К, после чего рассчитывают нормальный коэффициент отражения как их среднее арифметическое:

$$R_n = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} R_n(\lambda_i). \quad (1)$$

Далее определяют нормальный коэффициент эмиссии:

$$\varepsilon_n = 1 - R_n \quad (2)$$

с последующим пересчетом в интегральные полусферические величины с использованием рекомендованных эмпирических коэффициентов.

Собственная приборная база для проведения таких исследований в Украине отсутствует. Стоимость же ИК-спектрофотометра импортного производства со спектральным диапазоном до 25 мкм составляет от 150 тыс. до 500 тыс. грн., а стоимость прибора со спектральным диапазоном до 50 мкм в 2-3 раза выше. Вследствие длительности и дороговизны подобных исследований, проводят их, как правило, один раз при сертификации нового типа энергоэффективного стекла при уже отработанной технологии производства, или вообще используют литературные данные для близких аналогов.

В ИТТФ НАН Украины была разработана уникальная установка модели ИТРС-1 [6] (рис. 1) для измерения интегральных полусферических ТРХ диффузно и зеркально отражающих поверхностей в длинноволновом участке спектра ИК-излучения.

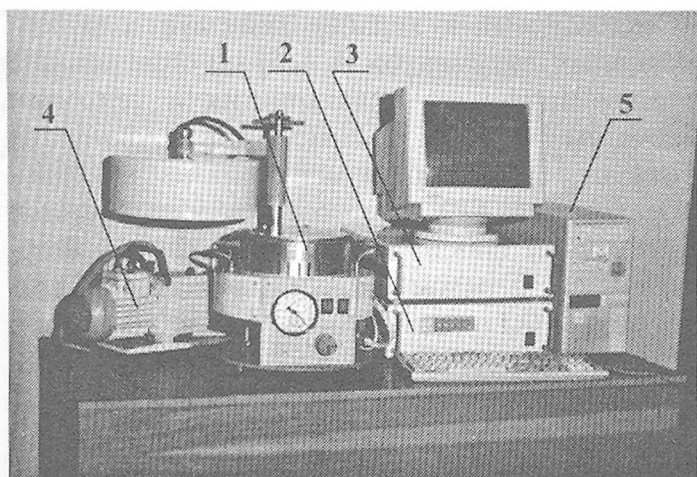


Рис. 1. Установка ИТРС-1:

- 1 – тепловой блок; 2 – электронный блок;  
3 – блок регуляторов; 4 – вакуумный насос;  
5 – компьютер с ПО.

Технические характеристики  
установки ИТРС:

- Диапазон измерения ТРХ 0,02 ... 0,97
- Предел основной абсолютной погрешности 0,02
- Температурный диапазон измерений от 20 до 50 °С
- Толщина образцов, не более 8 мм

Схема теплового блока установки ИТРС-1 представлена на рис. 2. Замкнутое пространство образовано основанием 1 и излучателем 2, изготовленными из высокотеплопроводного металла. Основание 1 выполнено в виде плоской плиты, а излучатель 2 – в виде перевернутого короткого цилиндрического стакана, внутренняя поверхность которого (цилиндр и дно), покрыта мелкими V – образными канавками с чернящим покрытием, что обеспечивает коэффициент эмиссии (степень черноты) не менее  $\varepsilon_2 = 0,95$ . Основание 1 и излучатель 2 имеют встроенные нагреватели, преобразователи температуры и т.п. Образец исследуемого материала 4 (например, стекло с низкоэмиссионным покрытием), устанавливается на поверхность пластины термопреобразователей 3.

Установка ИТРС-1 реализует калориметрический метод измерения интегральных полу-

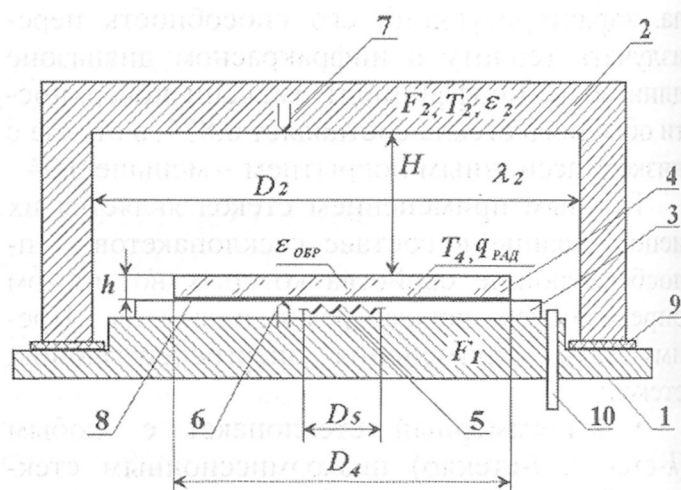


Рис. 2. Схема теплового блока установки ИТРС-1:

- 1 – основание; 2 – излучатель;  
3 – пластина термопреобразователей;  
4 – образец материала; 5 – преобразователь  
теплового потока (ПТП);  
6, 7 – преобразователи температуры  
поверхности; 8 – теплопроводная смазка;  
9 – эластичная прокладка;  
10 – патрубок для вакуумирования  
замкнутого пространства.

сферических ТРХ при первичной информации о потоках теплового излучения, полученной с применением термоэлектрических преобразователей теплового потока. Расчет производится по формуле:

$$\varepsilon_{\text{обр}} = \frac{q_{\text{рад}}}{\sigma_0 (T_2^4 - T_4^4) - q_{\text{рад}} \times \frac{F_1}{F_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}, \quad (3)$$

$$\text{где } q_{\text{рад}} = q_{\text{ПТП}} - (T_2 - T_4) \cdot \lambda_2 / H. \quad (4)$$

Установка ИТРС-1 существует в единичном экземпляре, а препятствием для широкого внедрения этой установки в практику исследований энергоэффективных стекол и покрытий является необходимость применения эталонных мер с известным коэффициентом поглощения для определения констант прибора при калибровке.

На данный момент актуальной является разработка методики для определения коэф-

фициента эмиссии энергосберегающих стекол и покрытий, которая может быть реализована на собственной приборной базе. В ИТТФ НАН Украины проведен поиск аналитических решений по вопросам исследования терморadiационных характеристик покрытий; разработаны теоретические принципы методики измерений коэффициента эмиссии энергоэффективных стекол и покрытий и проведено ее экспериментальное подтверждение с использованием изготовленной согласно ДСТУ ISO 8301:2007 [7] установки ИТ-7С (рис. 3), предназначенной для определения теплового сопротивления и коэффициента теплопроводности строительных материалов [8]. Установка ИТ-7С также является разработкой ИТТФ НАНУ и не имеет аналогов в Украине.

#### Технические характеристики установки ИТ-7С:

- Диапазон значений коэффициента теплопроводности от 0,02 до 3,0 Вт/(м·К)
- Границы допустимой основной относительной погрешности измерений 3 %
- Диапазон значений рабочей температуры от минус 40 до 180 °С
- Диапазон значений средней температуры образца от минус 35 до 175 °С
- Размер образца 300×300×120 мм (max)

Для проведения измерений ТРХ энергоэффективных покрытий на установке ИТ-7С формируют опытный образец (рис. 4) в виде блока (пакета) из стекол с воздушным промежутком заданной величины  $h_{\text{возд}}$ . Стекла располагают параллельно одно к другому, при этом стороны с покрытием должны быть внутри, то есть, обращены друг к другу. Пакет стекол устанавливают в измерительную ячейку теплового блока установки ИТ-7С и задают значения температуры нагревателя  $T_{\text{нагр}}$  и холодильника  $T_{\text{хол}}$  блока таким образом, чтобы перепад температуры на поверхностях опытного пакета составлял приблизительно 10 °С. В стационарном режиме из-

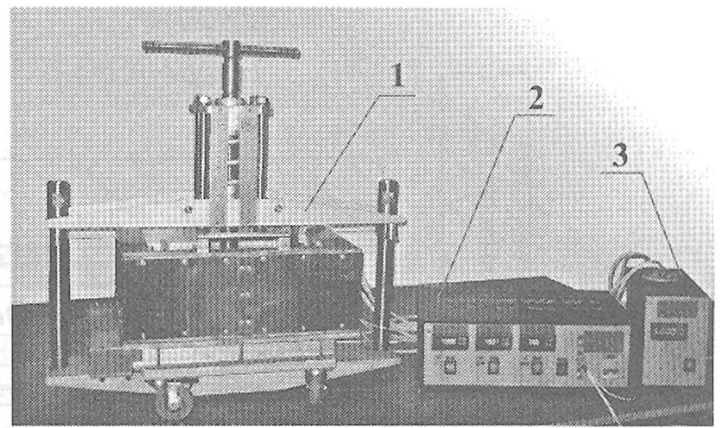


Рис. 3. Внешний вид установки ИТ-7С:  
1 – тепловой блок, 2 – электронный блок,  
3 – блок термостатирования опорных спаев.

меряют разницу температур на верхней и нижней поверхностях блока стекол и плотность теплового потока, проходящего сквозь этот блок.

На основании проведенных измерений рассчитывают тепловое сопротивление пакета стекол по формуле

$$R_{\text{пак}} = \frac{\Delta T}{q_{\text{ср}}} = \frac{T_{\text{нагр}} - T_{\text{хол}}}{0,5 \cdot (q_{\text{нагр}} + q_{\text{хол}})} \quad (5)$$

С другой стороны, учитывая тепловое сопротивление самих стекол и теплообмен в воздушном зазоре, тепловое сопротивление блока стекол составляет:

$$R_{\text{пак}} = 2R_{\text{ст}} + \left( \frac{1}{R_{\text{возд}}} + \frac{1}{R_{\text{рад}}} \right)^{-1} = \frac{2h_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \left( \frac{\lambda_{\text{возд}}}{h} + 4\varepsilon_{\text{пр}} \sigma T_{\text{ср}}^3 \right)^{-1}, \quad (6)$$

где тепловое сопротивление стекла и воздушного зазора равны, соответственно:

$$R_{\text{ст}} = h_{\text{ст}} / \lambda, \quad R_{\text{возд}} = h_{\text{возд}} / \lambda_{\text{возд}}. \quad (7)$$

Величина, обратная радиационной составляющей теплового сопротивления воздушного зазора составляет:

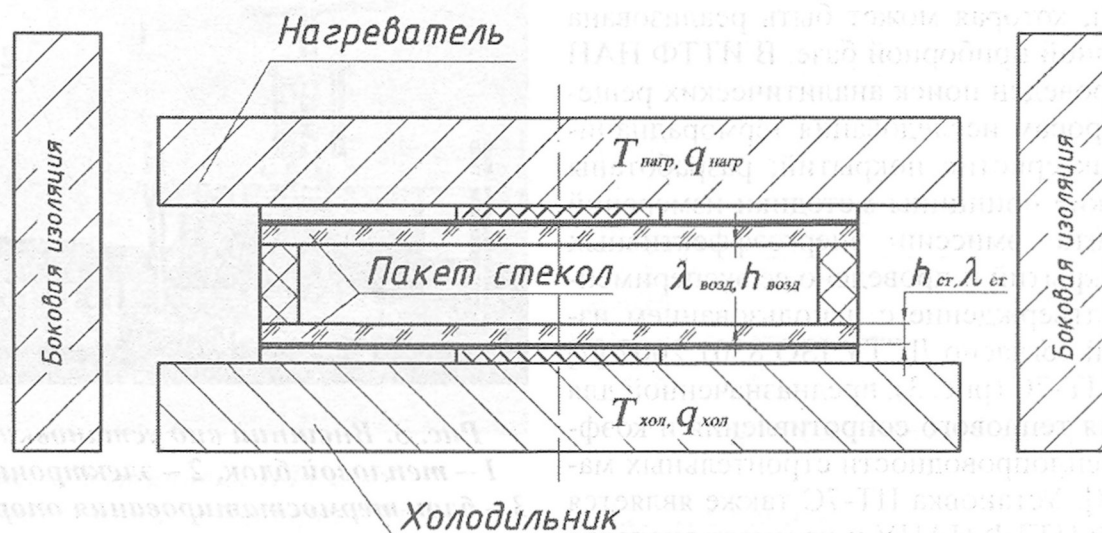


Рис. 4. Схема размещения опытного пакета в измерительной ячейке теплового блока установки ИТ-7С.

$$1/R_{\text{рад}} = 4\varepsilon_{\text{пр}} \sigma T_{\text{ср}}^3, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенный коэффициент эмиссии пакета;

$T_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (T_{\text{нагр}} + T_{\text{хол}})$  – среднее значение температуры пакета, К;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К}^4)$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Из выражения (8) с учетом (5) – (7) получим формулу для расчета :

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \frac{\left[ \left( \frac{\Delta T}{q_{\text{ср}}} - \frac{2h_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} \right)^{-1} - \frac{\lambda_{\text{возд}}}{h_{\text{возд}}} \right]}{4\sigma T_{\text{ср}}^3}. \quad (9)$$

Используя полученное значение приведенного коэффициента эмиссии пакета и учитывая, что для двух бесконечных параллельных пластин справедливым является выражение [9]

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1/(2 \cdot \varepsilon_{\text{пок}}^{-1} - 1), \quad (10)$$

рассчитывают коэффициент эмиссии поверхности энергоэффективного стекла (покрытия) по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пок}} = 2/(\varepsilon_{\text{пр}}^{-1} + 1). \quad (11)$$

Апробация методики проведена путем исследования чистых прозрачных и затененных стекол, а также стекол с низкоэмиссионным мягким (*i*-стекло) и жестким (*k*-стекло) покрытием с варьированием толщин стекла и воздушной прослойки в опытном пакете. Результаты испытаний методики, представленные в табл. 1, показывают, что полученные данные соответствуют справочным и сертификационным данным для низкоэмиссионных стекол в пределах погрешности измерений.

Данная методика может найти применение как в научных исследованиях, так и для массовых технических измерений с целью контроля качества вновь созданных и уже выпускаемых образцов стекол, как чистых, так и с энергоэффективным покрытием, а также при испытаниях и сертификации стеклопакетов. Внедрение методики позволит оценивать реальные ТРХ стекол и покрытий с использованием существующего приборного оборудования отечественного производства, а именно – на установках ИТ-7С, которыми оснащены ведущие лаборатории и сертификационные центры Украины.

Табл. 1. Результаты апробации методики

| Тип стекла           | Коэффициент эмиссии $\varepsilon$                         |                          |
|----------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------|
|                      | справочные данные                                         | экспериментальные данные |
| <b>Чистое стекло</b> | <b>0,837</b><br>ДСТУ EN 673:2009<br>ДСТУ Б В.2.7-228:2009 | <b>0,838...0,843</b>     |
| <b>i-стекло</b>      | <b>0,06...0,08</b><br>ДСТУ EN 673:2009                    | <b>0,055...0,062</b>     |
| <b>k-стекло</b>      | <b>0,18</b><br>ДСТУ Б В.2.7-115-2002<br>(ГОСТ 30733-2000) | <b>0,182...0,188</b>     |

### Выводы

1. Проведен поиск аналитических решений и разработаны теоретические принципы методики измерения коэффициента эмиссии энергоэффективных стекол и покрытий калориметрическим методом.

2. Проведена апробация и экспериментальное подтверждение методики с использованием установки для определения коэффициента теплопроводности строительных материалов ИТ-7С, изготовленной согласно ДСТУ ISO 8301:2007.

3. Разработанная ИТТФ НАН Украины методика позволяет провести расчет коэффициента эмиссии энергоэффективного стекла (покрытия) на базе результатов прямых измерений значений тепловых потоков, температуры и геометрических размеров опытного пакета без использования дефицитного и дорогого импортного оборудования и пересчета результатов измерений с применением эмпирических коэффициентов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ДСТУ EN 673:2009 Скло будівельне. Методика визначення коефіцієнта теплопередавання багатопшарових конструкцій (EN 673:1997, IDT).

2. ДСТУ Б В.2.7-228:2009 Будівельні матеріали. Скло з низькоемісійним м'яким покриттям. Технічні умови (ГОСТ 31364-2007, MOD).

3. ДСТУ ISO 10291:2009 Скло будівельне. Визначення коефіцієнта теплопередавання склопакета в усталеному режимі. Метод захищеної гарячої пластини (ISO 10291:1994, IDT).

4. ISO 10292:1994 Стекло строительное. Расчет коэффициента теплопередачи  $U$  в стационарном режиме при многослойном остеклении.

5. ISO 10293:1997 Стекло строительное. Определение величины  $U$  (коэффициента теплопередачи) в стационарном режиме для многослойного остекления. Метод с использованием измерителей теплового потока.

6. Декуша Л.В., Грищенко Т.Г. и др. Установка для прямого измерения интегральных полусферических терморadiaционных характеристик энергоэффективных стекол и покрытий ИТРС-1 // «Оконные технологии», № 23, 2006. – С. 36-39.

7. ДСТУ ISO 8301:2007 Теплоізоляція. Визначення теплового опору та пов'язаних із ним характеристик в усталеному режимі приладом із перетворювачем теплового потоку (ISO 8301:1991, IDT).

8. Бурова З., Воробйов Л., Декуша Л., Декуша О. Установка для вимірювання коефіцієнта теплопровідності будівельних матеріалів ИТ-7С // Метрологія та прилади. – Харків, 2009. – № 6 – С. 9-15.
9. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Пер. с англ. / Справочник. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.

Получено 06.10.2011г.