

УДК 536.3:536.6:691.624

Бурова З.А.¹, Декуша Л.В.¹, Воробьев Л.И.¹, Мазуренко А.Г.²

¹Институт технической теплофизики НАН Украины

²Национальный 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, м²;
 q – поверхностная плотность теплового потока, Вт/(м²·К);
 ε – коэффициент эмиссии поверхности;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;
 σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴).

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 – терморрадиационные 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/м² (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 расхождению 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 (λ) 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.

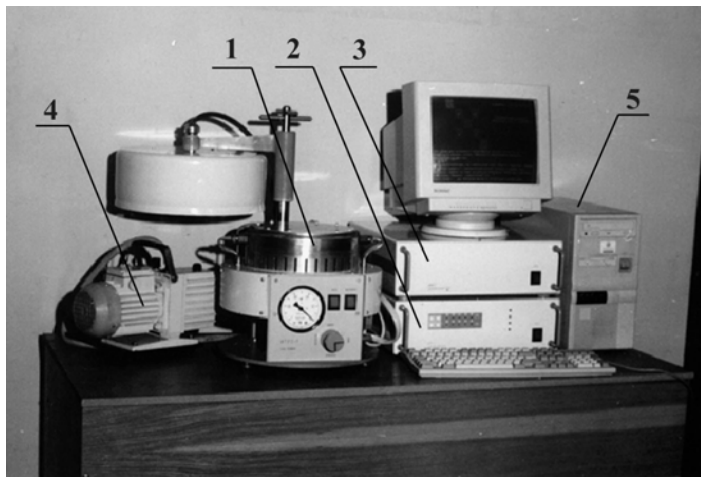


Рис. 1. Установка ИТРС-1:

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-

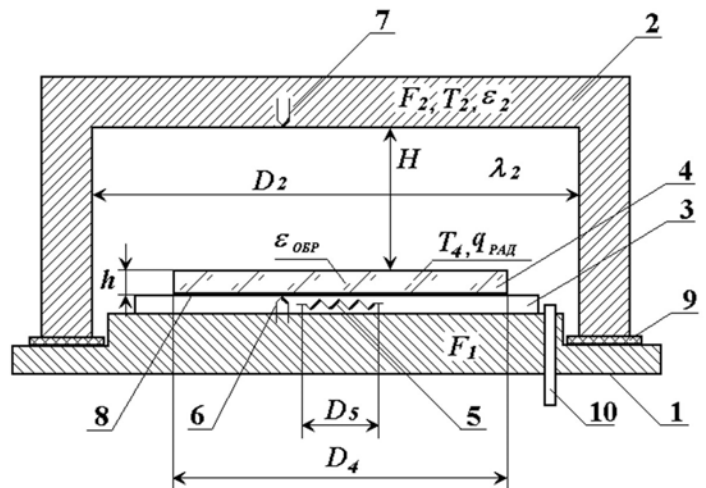


Рис. 2. Схема теплового блока установки ИТРС-1:

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:

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

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

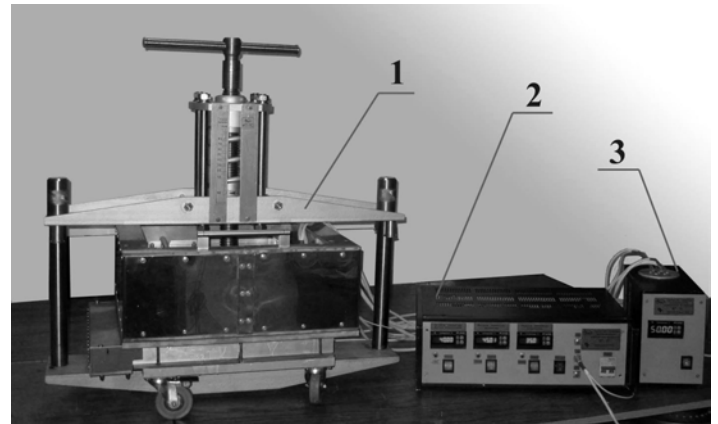


Рис. 3. Внешний вид установки ИТ-7С:
 1 – тепловой блок, 2 – электронный блок,
 3 – блок термостатирования опорных спаев.

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:

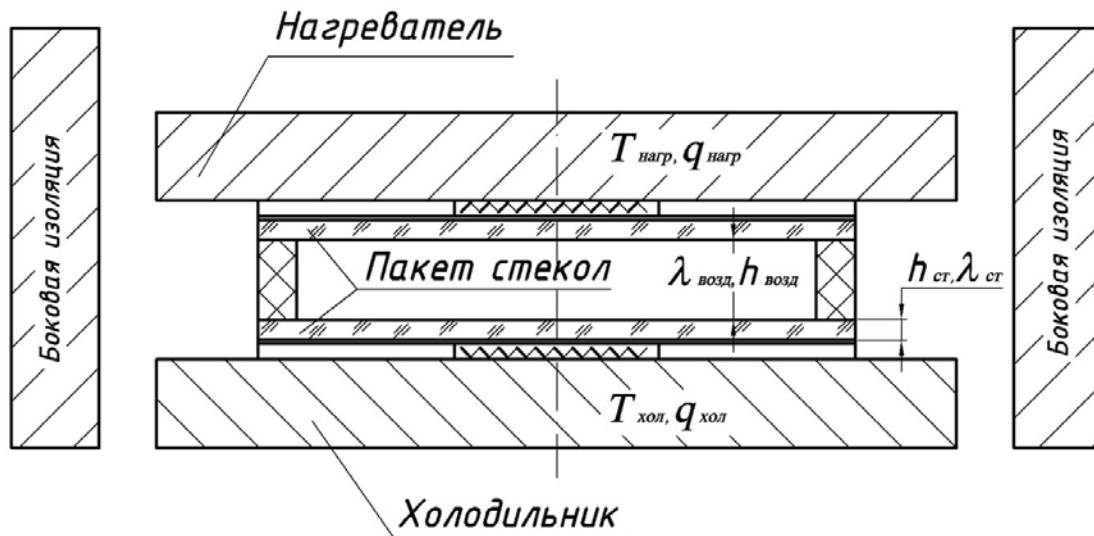


Рис. 4. Схема размещения опытного пакета в измерительной ячейке теплового блока установки ИТ-7С.

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

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;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – 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 ϵ	
	справочные данные	экспериментальные данные
Чистое стекло	0,837 ДСТУ EN 673:2009 ДСТУ Б В.2.7-228:2009	0,838...0,843
<i>i</i>-стекло	0,06...0,08 ДСТУ EN 673:2009	0,055...0,062
<i>k</i>-стекло	0,18 ДСТУ Б В.2.7-115-2002 (ГОСТ 30733-2000)	0,182...0,188

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 багатопарових конструкції (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 терморadiационных 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 06.10.2011 г.

УДК 697.7

Чорна Н.О.

Институт технічної теплофізики НАН України

ЗАСТОСУВАННЯ ПРОЗОРОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТА ЇЇ РОЛЬ В ЗАГАЛЬНОМУ ТЕПЛООБМІНІ ГЕЛІОКОЛЕКТОРА

В статті викладені теоретичні рекомендації щодо застосування скла в геліоколекторах. Викладено методику розрахунку загального термічного опору склопакету. За цією методикою розраховано R_0 в залежності від кута нахилу геліоколектора та ширини повітряного прошарку в склопакеті при заповненні його різними видами інертного газу.

В статье изложены теоретические рекомендации к применению стекла в гелиоколекторах. Представлено методику расчёта общего термического сопротивления стеклопакета. По этой методике рассчитано R_0 в зависимости от угла наклона гелиоколектора та ширини воздушной прослойки в стеклопакете при заполнении его разными видами инертного газа.

In the article present theoretical recommendations of using glass in solar engineering. Offer method of account total thermal resistance. Account total thermal resistance by this method according tilt angle of heliocollector and width of aerial layer in double-glazing unit with stuffing different kind of rare gas.

A – поглинаюча здатність газу;
 c – теплоємність;
 F – площа поверхні оболонки газу;
 h – товщина повітряного прошарку;
 I – поглинання сонячного випромінювання;
 K – коефіцієнт теплопередачі повітряного прошарку;
 Q – кількість теплоти;
 R – термічний опір;
 T – температура;
 β – коефіцієнт термічного розширення газу;
 δ – товщина скла;
 ε – ступінь чорноти поверхні скла;
 μ – динамічна в'язкість газу;
 ρ – коефіцієнт відбиття скла;
 λ – коефіцієнт теплопровідності газу;

τ – пропускна здатність;
 ККД – коефіцієнт корисної дії.

Нижні індекси:

a – поглинання;
 r – відбиття;
 v – внутрішній;
 вип – випромінювання;
 $г$ – газ;
 $з$ – зовнішній;
 кон – конвекція;
 c – ступінь чорноти;
 ск – скло;
 ср – середній;
 o – опір;
 пв – повітряний прошарок.

Прозора ізоляція сонячного колектора – це покриття або система покриттів, розташованих над теплосприймаючою поверхнею, прозорих

відносно сонячної енергії [1]. Основним призначенням прозорої ізоляції є зменшення кондуктивно-конвективних та променевих втрат