

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 променивих втрат

через замкнений повітряний прошарок [2].

До прозорої ізоляції висувають наступні вимоги: висока пропускна та низька відбиваюча здатність для короткохвильової частини спектру; висока відбиваюча здатність для інфрачервоного випромінювання; достатня механічна міцність; фізико-хімічна стабільність під дією ультрафіолетового випромінювання.

Скло є одним з найбільш доцільних матеріалів в якості прозорої ізоляції геліоколектора [3], так як воно має ряд переваг, а саме доступність, гарна пропускна здатність, непроникність для довгохвильового теплового випромінювання, термічна стійке при високих температурах, порівняна стійкість до подряпин та дії атмосферних факторів. До недоліків скла можна віднести складність в транспортуванні та зберіганні, нездатність перекивати великі площі, необхідність застосування великої кількості складних та коштовних деталей кріплення внаслідок розмірних обмежень, висока вартість.

Особливо високу прозорість має оптичне скло [4]. Теоретично навіть ідеальне, непоглинаюче світло скло не може пропускати більше 92 %, так як обидві його поверхні відбивають не менше 8 % світлових променів. В геліотехніці застосовується скло, яке поглинає в незначній частині спектру сонячної енергії при малому вмісті заліза (Fe_2O_3) [5]. Якщо вміст заліза великий, то скло буде поглинати в інфрачервоній області сонячного спектру, що утворить в середині геліоколектора так званий тепличний ефект.

При встановленні прозорої ізоляції на геліоколектор, необхідно передбачити можливість термічного розширення та стиснення всередині рами прозорої ізоляції при одночасному забезпеченні герметичності для уникнення інфільтрації вологи та повітря [3]. Вона не повинна контактувати з металом через можливість перегрівання. В системах з подвійним заскленням проміжок між шарами повинен вентилуватись для видалення води в результаті протікання або конденсації вологи.

Вибір кількості покриттів є винятково

важливим фактором. Чим нижче температура зовнішнього повітря, тим більше число покриттів потрібне для отримання заданої робочої температури геліоколектора без зниження його ККД. Але потрібно враховувати, що збільшення кількості шарів скла, призводить до збільшення поглинання та відбиття сонячної енергії, в результаті менша частка енергії сонячного світла досягає поверхні теплоприймача. Це особливо актуально при гострих кутах падіння сонячного випромінювання.

Кожний шар покриття геліоколектора має дві границі розподілу, що обумовлює втрати на відбиття та поглинання [5]. Коефіцієнт відбиття ρ світла від поверхні скла – це відношення світлового потоку, відбитого від скла, до падаючого світлового потоку. Він залежить від коефіцієнта заломлення скла та довжини хвилі падаючого світла й розраховується за формулою Фрезеля:

$$\rho = \frac{U - (-1)}{U + 1} \cdot 2, \quad (1)$$

де U – коефіцієнт заломлення при задані довжині хвилі.

Якщо обидві сторони покриття межують з повітрям, то послаблення випромінювання буде однаковим на обох границях розподілу для кожної компоненти поляризації (рис. 1). Сумуючи долі випромінювання, яке пройшло через шар скла, отримаємо вираз для пропускної здатності одного покриття без врахування поглинання:

$$\tau_{r,1} = (1 - \rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{(1 - \rho)^2}{1 - \rho^2} = \frac{1 - \rho}{1 + \rho}. \quad (2)$$

Для системи, яка складається з n покриттів, виготовлених із однакового матеріалу, пропускна здатність розраховується за формулою [5]:

$$\tau_{r,n} = \frac{1 - \rho}{1 + (2n - 1)\rho}. \quad (3)$$

Вираз (3) вірний для кожної з двох компонент поляризації. Пропускна здатність відносно початково неполяризованого світла

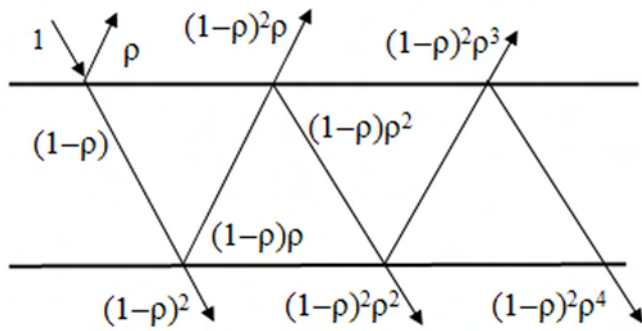


Рис. 1. Пропускання через одне покриття.

визначається як середнє арифметичне пропускних здатностей для цих двох компонент.

Поглинання сонячного випромінювання в прозорій ізоляції геліоколектора описується законом Бугера [5], який спирається на припущення, що поглинуте випромінювання пропорційне локальній інтенсивності випромінювання в цьому середовищі та відстані x , що проходить випромінювання:

$$dI = IPdx, \quad (4)$$

де P – коефіцієнт ослаблення, який в області сонячного спектру є постійним.

Пропускна здатність, яка враховує тільки поглинання, розраховують за формулою:

$$\tau_a = \frac{I_L}{I_0} = e^{-PL}, \quad (5)$$

де L – фактична довжина шляху випромінювання через середовище.

Щоб отримати пропускна здатність, яка враховує як відбиття, так і поглинання, необхідно перемножити пропускні здатності:

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a. \quad (6)$$

Додаткове покриття може забезпечити більш високий ККД геліоколектора, але це призводить до збільшення його вартості. Отже, оптимальна кількість шарів скла тим більша, чим вища потрібна температура теплоприймача [3]. В табл. 2 наведені розрахункові данні залежності пропускної здатності прозорої ізоляції геліоколектора від кількості покриттів

з листового скла.

Так, як рекомендований кут нахилу геліоколектора відносно горизонту змінюється від 30° до 60° , в залежності від широти місцевості, пори року та часу доби, то потрібно враховувати зміну пропускної здатності покриття залежно від зміни кута нахилу (табл. 3).

Прозора ізоляція має вирішальну роль в загальному процесі теплообміну геліоколектора [8]. С точки зору теплотехніки, звичайний однокамерний склопакет (рис. 2) представляє собою замкнений повітряний прошарок малої товщини в порівнянні з загальною площею геліоколектора.

В процесі теплопередачі через скло від внутрішнього повітря до зовнішнього беруть участь всі три види теплообміну: теплопровідність, конвекція та випромінювання [6]. В просторі між двома листами скла (в повітряних прошарках) передача тепла відбувається або

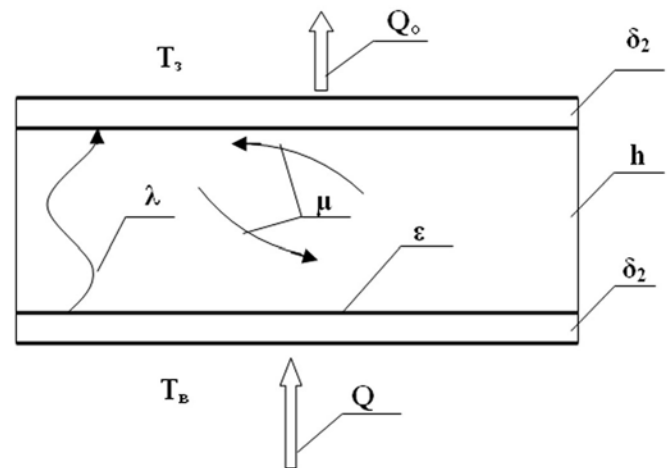


Рис. 2. Схема процесу теплопередачі через скло: T_3 – температура зовнішнього повітря; T_6 – температура внутрішня в колекторі; δ – товщині скла; h – товщина повітряного прошарку; Q – кількість тепла, що передається від колектора до прозорої ізоляції; Q_0 – тепловтрати геліоколектора в навколишнє середовище через прозору ізоляцію; μ – динамічна в'язкість газу; λ – теплопровідність газу; ε – ступінь чорноти поверхні скла.

Табл. 1. Значення коефіцієнтів поглинання, відбивання та пропускання [6]

Матеріал	Поглинання	Відбиття	Пропускання
Селікатне скло $\delta = 3\div 4$ мм	0,7	0,07	0,23
Органічне скло $\delta = 3\div 5$ мм	0,85	0,07	0,08
Стеклопластик	0,8	0,07	0,13
Плівка поліетиленова			
$\delta = 0,08\div 0,12$ мм	0,82	0,1	0,08
Теплозахисне скло з окисно-оловяно-сур'ямним покриттям	0,35...0,5	0,1...0,3	0,55...0,2

Табл. 2. Коефіцієнт світлопропускання листового скла в залежності від кількості листів [4]

Показник	Значення показників при кількості листів				
	1	2	3	4	5
Світлопропускання	0,92	0,84	0,77	0,72	0,66
Відбиття	0,08	0,15	0,21	0,25	0,30

Табл. 3. Зміна коефіцієнту світлопропускання скла залежно від кута падіння сонячного випромінювання [6]

Кут падіння, °	Коефіцієнт світлопропускання	Поправочний коефіцієнт для скла
0	0,92	1
30	0,90	1,10
40	0,89	1,15
50	0,87	1,20
60	0,83	1,25

теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням, або теплопровідністю та випромінюванням, або конвекцією та випромінюванням. Поблизу внутрішніх поверхонь скла теплопередача відбувається конвекцією та випромінюванням, а через тверді тіла конструкції (скло, ущільнювач, раму) – тільки теплопровідністю. Склад тепловтрат через однокамерний склопакет, який заповнений сухим повітрям, виглядає приблизно наступним чином: 65 % за рахунок випромінювання, 20 % за рахунок теплопровідності та приблизно 15 % за рахунок конвекції.

Загальний термічний опір склопакету визначається за формулою:

$$R_0 = R_{ск1} + R_{вп} + R_{ск2} \quad (7)$$

Термічний опір скла в склопакеті визначається як:

$$R_{ск i} = \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (8)$$

Аналізуючи формулу (8) можна сказати, що товщина скла не впливає на його теплозахисні властивості. Визначальну роль в теплозахисних властивостях склопакета грають дві складові теплообміну – випромінювання та конвекція.

Опір теплопередачі одного повітряного прошарку визначається за формулою [6]:

$$R_{mn} = \frac{1}{K_{mn}} = \frac{1}{K_{\text{кон}} + K_{\text{вип}}} \quad (9)$$

Потрібно враховувати динамічну в'язкість μ газу, яка характеризує опір руху теплих та холодних струмин всередині об'єму заповненого газом, викликану нерівномірним нагрівом обмежуючих поверхонь. Величина μ відображає здатність газу, опиратися конвективному переносу тепла.

Коефіцієнт теплопередачі повітряного прошарку за рахунок конвекції та теплопровідності газу, який заповнює прошарок, визначається за формулою:

$$K_{\text{кон}} = \text{Nu} \frac{\delta}{\lambda}, \quad (10)$$

де Nu – число Нусельта, що обчислюється за результатами експериментальних досліджень теплопередачі через нахилені прошарки газу [9]. Nu є функція числа Релея Ra, відношення висоти прошарку до його кута нахилу θ .

$$\text{Nu} = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{\text{Ra} \cos \theta} \right] \left[1 - \frac{1708 \sin^{1,6}(1,8 \cdot \theta)}{\text{Ra} \cos \theta} \right] + \left[\left[\frac{\text{Ra} \cos \theta}{5830} \right]^{1/3} - 1 \right], \quad (11)$$

$$\text{Ra} = \frac{\rho^2 \delta^3 \beta c_p \Delta T}{\mu \lambda}, \quad (12)$$

$$\beta = \frac{1}{T_c}, \quad (13)$$

T_c – середня температура газу в прошарку, К;

Коефіцієнт теплообміну за рахунок випромінювання визначається за формулою [8]:

$$K_{\text{вип}} = q_{\text{вип}} / \Delta T. \quad (14)$$

Якщо повітряний прошарок склопакета заповнений газом, то газ знаходиться в оболонці, яка має властивості сірого тіла, а отже частина енергії, яка випромінюється газом, поглинається склопакетом, а частина її відбивається [10]. Відбита склом енергія частково поглинається

газом, а частково знову потрапляє на поверхню скла. Результируючий тепловий потік при теплообміні випромінюванням між газом та склом визначається, як різниця між променевим потоком, який випромінює газ на оболонку, та частиною випромінювання скла, яке поглинається газом:

$$q_{\text{г.с}} = c_0 \varepsilon_{\text{эф.с}} \left[\varepsilon_{\text{г}} \left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - A_{\text{г}} \left(\frac{T_{\text{ск}}}{100} \right)^4 \right] F_{\text{ск}}, \quad (15)$$

$\varepsilon_{\text{эф.с}}$ – ефективна ступінь чорноти оболонки в поглинаючому середовищі

Так як теплообмін через повітряний прошарок відбувається не лише за рахунок теплопровідності, а й за рахунок променевого переносу теплоти, то в якості основного процесу теплообміну приймається теплове випромінювання. Вплив теплопровідності та конвекції враховується відповідним збільшенням ступеня чорноти. В цьому випадку потік теплоти, що переноситься за рахунок теплопровідності та конвекції, представляється по аналогії з законом Стефана-Больцмана [10]:

$$q_k = \varepsilon_k c_0 \left[\left(\frac{T_{\text{г}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ск}}}{100} \right)^4 \right]. \quad (16)$$

Товщина повітряного прошарку між листами скла обирається головним чином виходячи з його впливу на ККД колектора та вартість монтажу. ККД геліоколектора залежить від ізолюючої здатності повітряного прошарку різної товщини.

На основі літературного аналізу можна сказати, що рекомендована товщина повітряного прошарку для склопакетів, які застосовуються в геліотехніці, знаходиться в межах від 12 мм до 30 мм [1, 2, 6]. Цей діапазон доволі широкий, до того ж не відомо чи однакові ці рекомендації для різних типів газів, яким буде заповнений цей прошарок.

За наведеною вище методикою було розраховано загальний опір теплопередачі одношарового склопакету для геліоколектора в залежності від технічних характеристик газу

(табл. 4), яким заповнюється прості між склом.

За графіком (рис. 3) можемо зробити висновок, що при заповненні прошарку між склом повітрям або аргоном показники будуть майже однаковими. Найбільше значення термічного опору $R_0 = 0,63 \text{ Вт/м}^2$ маємо при товщині прошарку $h = 0,24 \text{ м}$. При використанні криптону найбільше значення термічного опору $R_0 = 0,63 \text{ Вт/м}^2$ досягається при товщині прошарку $h = 0,16 \text{ м}$.

Якщо, на основі наведених розрахунків, вважати оптимальною товщину прошарку між склом для будь-якого виду газу $h = 0,20 \text{ м}$, то можна розрахувати характер зміни загального термічного опору в залежності від кута нахилу геліоколектора. Дані розрахунків представлені

на рис. 4.

За графіком (рис. 4) можна зробити висновок, що аргон та повітря змінюють загальний термічний опір однаково в залежності від зміни кута нахилу геліоколектора, та мають більш високу ефективність при рекомендованому куті нахилу геліоколектора для широти України ніж криптон, застосування якого більш ефективно при куті нахилу геліоколектора від 50° і більше.

Висновок

Найбільш доцільним матеріалом в якості прозорої ізоляції для використання в геліоколекторах є скло, хоча воно має свої переваги та недоліки. Особливу увагу потрібно

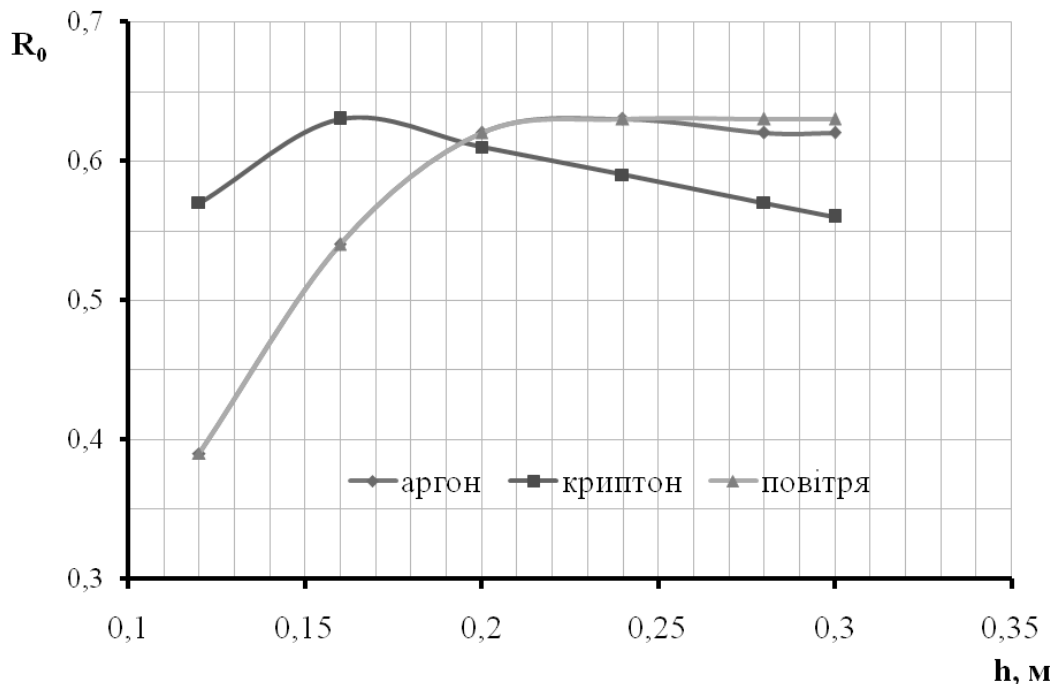


Рис. 3. Залежність загального термічного опору від товщини повітряного прошарку при куті нахилу геліоколектора $\theta = 45^\circ$.

Табл. 4. Технічні характеристики газів, які застосовуються для заповнення склопакетів [8]

Газ	$T, ^\circ\text{C}$	Густина, $P, \text{ кг/м}^3$	Теплопровідність, $\lambda \cdot 10^{-2}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Динамічна в'язкість, $\mu \cdot 10^{-5}, \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$	Теплоємність, $C, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$
Повітря	+10	1,232	2,496	1,761	1,008
Аргон (Ar)	+10	1,699	1,684	2,164	0,519
Криптон (Kr)	+10	3,560	0,900	2,670	0,245

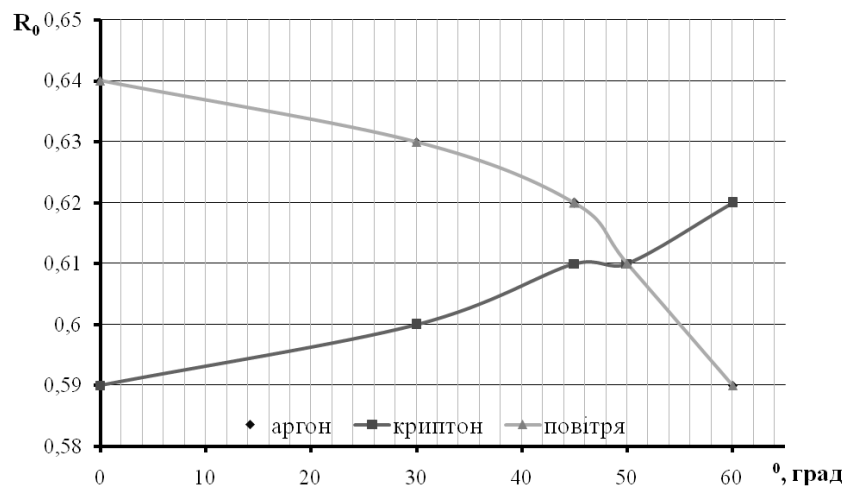


Рис. 4. Залежність загального термічного опору від кута нахилу геоліоколектора, при товщині повітряного прошарку $h = 0,20$ м.

приділяти вибору кількості шарів скла в конструкції прозорої ізоляції виходячи з аналізу умов експлуатації геліоколектора, так як додаткове покриття призводить не тільки до збільшення ККД, але й до збільшення вартості геліоколектора. Оптимальна кількість шарів скла тим більша, чим вища потрібна температура теплоприймача.

Прозора ізоляція має вирішальну роль в загальному процесі теплообміну геліоколектора. Аналіз результатів розрахунку загального опору теплопередачі одношарового склопакету для геліоколектора в залежності від технічних характеристик газу згідно запропонованого методу показав, що застосування повітря або аргону є ефективним при ширині прошарку між склом від $h = 0,2$ м та куті нахилу геліоколектора до 50° . За результатами розрахунку при $h < 0,2$ м та куті нахилу геліоколектора більше 50° оптимальні параметри має криптон, але виходячи з рекомендацій щодо обладнання та розміщення геліоколекторів, використовувати цей вид газу технічно та економічно недоцільно.

ЛІТЕРАТУРА

1. Сировакша В.Ю., Марков В.П., Петров Б.Є. Теплові розрахунки геліосистем. Моногр.

– Д.: Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2003р. – 132 с.

2. Клиндт А., Клейн В. Стекло в строительстве. Свойства. Применение. Расчеты. – М.: Стройиздат, 1981 – 286 с.

3. Селективные поверхности и покрытия в гелиотехнике/ Колтун М.М. // Гелиотехника – 1971, № 5.

4. Айранетов Г.А. Строительные материалы. Справочник. – Ростов-на-Дону, 2005 – 603 с.

5. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии: пер. с англ. – М: Мир, 1977 – 420 с.

6. Дроздов В.А. Теплообмен в светопрозрачных ограждающих конструкциях. – М.: Стройиздат, 1979 – 307 с.

7. Швачко Н.А. Трубчатый коллектор солнечной энергии для гелиосистем теплоснабжения. к.т.н./ КИСИ – К.: 1992 – 136 с.

8. Проектирование оконных систем. www.allofremont.com.

9. ISO 15099:2003 Теплотехнические свойства окон, дверей и солнцезащитных устройств – процедуры подробного расчёта.

10. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача – М.-Л.: «Энергия», 1965 – 424 с.

Получено 06.12.2011 р.