

## ЛУЧЕПОГЛОЩАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПОМЕЩЕНИЙ С ИНСОЛЯЦИОННОЙ ПАССИВНОЙ СИСТЕМОЙ ОТОПЛЕНИЯ

*Р.Р. Аvezov<sup>1,2</sup>, Н.Р. Аvezova<sup>1,2</sup>, Э.Ю. Рахимов<sup>1</sup>, М.А. Куралов<sup>1</sup>,  
Д.У. Абдухамидов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Международный институт солнечной энергии  
корп. 2, д. 2б, ул. Бодомзор йули, Ташкент, 100084, Республика Узбекистан  
тел.: (+998) 71 235-40-90; факс: (+998) 71 235-03-77; e-mail: avezov@uzsci.net  
<sup>2</sup>Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз  
д. 2б, ул. Бодомзор йули, Ташкент, 100084, Республика Узбекистан  
тел.: (+998) 71 235-42-42; факс: (+998) 71 233-12-71; e-mail: avezov@uzsci.net

doi: 10.15518/isjaee.2017.07-09.034-042

Заключение совета рецензентов: 27.01.17 Заключение совета экспертов: 03.02.17 Принято к публикации: 09.02.17

Приведены результаты исследований по установлению расчетных выражений для определения значений поглотительной ( $\alpha_{hp}$ ) и приведенной поглотительной ( $\tau_{te}\alpha_{hp}$ ) способностей помещений с инсоляционными пассивными системами отопления (ИПСО). При выполнении исследований помещение с ИПСО рассматривалось как плоский солнечный коллектор, имеющий большую толщину воздушной прослойки между светопрозрачным покрытием корпуса и лучепоглощающей панелью. Предполагалось, что плотность потока солнечного излучения, проходящего через светопрозрачное ограждение и выходящего в отапливаемое помещение, изотропно распределена по поверхностям элементов интерьера вследствие многократного внутреннего отражения.

По результатам выполненных исследований предложены расчетные выражения для определения ( $\alpha_{hp}$ ) и ( $\tau_{te}\alpha_{hp}$ ) помещений с ИПСО и приведен практический пример по их реализации.

Ключевые слова: солнечное излучение; отапливаемое помещение; инсоляционная пассивная система отопления; светопрозрачное ограждение; поглотительная способность; приведенная поглотительная способность.

## RAY ABSORPTION ABILITY CAPACITY BY PREMISES WITH INSOLATION PASSIVE HEATING SYSTEM

*R.R. Avezov<sup>1,2</sup>, N.R. Avezova<sup>1,2</sup>, E.Yu. Rakhimov<sup>1</sup>, M.A. Kuralov<sup>1</sup>, D.U. Abdukhamidov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>International Solar Energy Institute  
bild. 2, 2b Bodomzor Yuli str., Tashkent, 100084, the Republic Uzbekistan  
tel.: (+998) 71 235-40-90; факс: (+998) 71 235-03-77; e-mail: avezov@uzsci.net  
<sup>2</sup>Physical-Technical Institute, SPA "Physics-Sun", Uzbek Academy of Sciences  
2b Bodomzor Yuli str., Tashkent, 100084, the Republic Uzbekistan  
tel.: (+998) 71 235-42-42; факс: (+998) 71 233-12-71; e-mail: avezov@uzsci.net

doi: 10.15518/isjaee.2017.07-09.034-042

Referred 27 January 2017 Received in revised form 3 February 2017 Accepted 9 February 2017

The results of research were presented on the calculation expressions to define values of absorptance ( $\alpha_{hp}$ ) and reduced-absorptance ( $\tau_{te}\alpha_{hp}$ ) of premises with insolation passive heating systems (IPHS). When the research, premise IPHS considered as flat-plate solar collector, which has a greater thickness of air layer between the translucent coating and light-absorbing panel. It is assumed that the flux density of solar radiation passing through the translucent

enclosure and entering inside the heated premises, isotropically distributed over the surfaces of the elements of its interior due to multiple internal reflection.

From the results of researches was proposed calculation expressions to determine  $(\alpha_{hp})$  and  $(\tau_{te}\alpha_{hp})$  of premises with IPHS and presented a practical example of their implementation.

Key words: solar radiation; heated premises; insolation passive heating system; translucent enclosure; absorption ability; reduced absorption ability.



*Раббанакул Рахманович  
Авезов  
Rabbanakul Avezov*

**Сведения об авторе:** д-р тех. наук, профессор, глав. науч. сотрудник лаборатории солнечных тепловых и энергетических установок, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз; глав. науч. сотрудник отдела «Солнечное теплоснабжение», Международный институт солнечной энергии.

**Образование:** Бухарский государственный педагогический институт, учитель физики (1965 г.).

**Область научных интересов:** тепловое преобразование и использование солнечной энергии; возобновляемые источники энергии.

**Публикации:** более 350.

**Information about the author:** D.Sc. (engineering), Chief Researcher of Solar Thermal and Power Installation Laboratory, Physical-Technical Institute of the SPA "Physics-Sun", Uzbek Academy of Sciences; Chief Researcher of Department of "Solar Heat Supply", International Solar Energy Institute.

**Education:** Bukhara State Pedagogical Institute (teacher of physics), 1965.

**Research area:** the thermal conversion and use of solar energy; renewable energy sources.

**Publications:** more than 350.



*Нилуфар  
Раббанакуловна  
Авезова  
Nilufar Avezova*

**Сведения об авторе:** канд. тех. наук, вед. науч. сотрудник, начальник отдела «Солнечное теплоснабжение», Международный институт солнечной энергии; заведующая лабораторией солнечных тепловых и энергетических установок, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

**Образование:** Ташкентский государственный университет, математик (1994 г.).

**Область научных интересов:** тепловое преобразование и использование солнечной энергии; возобновляемые источники энергии.

**Публикации:** более 120.

**Information about the author:** Ph.D. (engineering), Leading Researcher, Head of Department of "Solar Heat Supply", International Solar Energy Institute; Head of Solar Thermal and Power Installation Laboratory, Physical-Technical Institute of the SPA "Physics-Sun", Uzbek Academy of Sciences.

**Education:** Tashkent State University (mathematician), 1994.

**Research area:** the thermal conversion and use of solar energy; renewable energy sources.

**Publications:** more than 120.



*Эргашали Юлдашевич  
Рахимов  
Ergashali Rakhimov*

**Сведения об авторе:** млад. науч. сотрудник отдела «Солнечное теплоснабжение» Международного института солнечной энергии.

**Образование:** Национальный университет Узбекистана им. Мирзы Улугбека, радиопизик, физик (2011 г.).

**Область научных интересов:** радиопизика; оптика; возобновляемые источники энергии.

**Публикации:** 26.

**Information about the author:** Junior Researcher of Solar Heat Supply Department, International Solar Energy Institute.

**Education:** National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek (physicist, radio physicist), 2011.

**Research area:** radio physics; optics; renewable energy sources.

**Publications:** 26.



*Муродбек  
Артикалиевич Куралов  
Murodbek Kuralov*

**Сведения об авторе:** млад. науч. сотрудник отдела «Солнечное теплоснабжение» Международного института солнечной энергии.

**Образование:** Ташкентский государственный технический университет им. Абу Райхана Беруни, «Автоматика и управление» (2013 г.).

**Область научных интересов:** электроника; тепловое преобразование и использование солнечной энергии; возобновляемые источники энергии.

**Публикации:** 15.

**Information about the author:** Junior Researcher of Department of "Solar Heat Supply" International Solar Energy Institute.

**Education:** Tashkent State Technical University named after Abu Raykhan Beruni (automatics and control), 2013.

**Research area:** electronics; the thermal conversion and use of solar energy; renewable energy sources.

**Publications:** 15.





Дийдорбек Улуғбекович  
Абдухамидов  
Diyorbek Abdukhamidov

**Сведения об авторе:** млад. науч. сотрудник лаборатории солнечных тепловых и энергетических установок, Физико-технический институт НПО «Физика-Солнце» АН РУз.

**Образование:** Ташкентский архитектурно-строительный институт (2002 г.).

**Область научных интересов:** тепловое преобразование и использование солнечной энергии; возобновляемые источники энергии.

**Публикации:** 10.

**Information about the author:** Junior Researcher of Solar Thermal and Power Installation Laboratory, Physical-Technical Institute of the SPA "Physics-Sun", Uzbek Academy of Sciences.

**Education:** Tashkent Institute of Architecture and Construction, 2002.

**Research area:** the thermal conversion and use of solar energy; renewable energy sources.

**Publications:** 10.

<b>Список обозначений</b>	
<i>Буквы греческого алфавита</i>	
$\alpha$	Коэффициент теплообмена, коэффициент поглощения СИ
$\tau$	Коэффициент пропускания СИ
$\rho$	Плотность, коэффициент отражения солнечного излучения
<i>Буквы латинского алфавита</i>	
$F$	Площадь поверхности
$q$	Поверхностная плотность потока тепла
$Q$	Поток солнечного излучения
<i>Индексы верхние</i>	
$dir$	Прямое (direct)
$dif$	Диффузное (diffuse)
$in$	Внутренний (inner)
$fr$	Фронтальная (frontal)
<i>Индексы нижние</i>	
$a$	Апертура (aperture)
$abs$	Поглощенное (absorbing)
$al$	Воздушная прослойка (air layer)
$amb$	Окружающая среда (ambient)
$cr$	Полостной приемник (cavity receiver)
$dd$	Пыль и грязь (dust and dirt)
$fall$	Падающее (falling)
$fic$	Рама светопрозрачного покрытия (frame of translucent cover)
$hp$	Отапливаемое помещение (heated premise)
$intr$	Интерьер (interior)
$lap$	Лучепоглощающая панель (light-absorbing panel)
$refl$	Отраженное (reflected)
$t$	Светопрозрачное (translucent)
$te$	Светопрозрачное ограждение (translucent enclosure)
$trnsmt$	Прошедший (transmitted)
<i>Индексы вторичные нижние</i>	
$eff$	Эффективное (effective)
$hp$	Отапливаемое помещение (heated premise)
$tc-lap$	Между светопрозрачным покрытием и лучепоглощающей панелью (between the $tc$ surface and $lap$ surface)
$te$	Светопрозрачное ограждение (translucent enclosure)
<i>Единицы измерения</i>	
$m^2$	Квадратный метр
<i>Аббревиатуры</i>	
ИПСО	Инсоляционного пассивного система отопления
ЛП	Лучепоглощающая панель
ОП	Отапливаемое помещение
ПСК	Плоский солнечный коллектор
СИ	Солнечное излучение
СП	Светопрозрачное покрытие
СПО	Светопрозрачное ограждение

## Введение

Принцип действия инсоляционных пассивных систем отопления (ИПСО) основан на непосредственном вхождении солнечного излучения (СИ) внутрь отапливаемых помещений (ОП) через их светопрозрачные ограждения (СПО) увеличенных размеров (по сравнению с обычными окнами и светопроемами) на южной стене. При этом поверхностные слои внутренних ограждений ОП выполняют роль поглотителя СИ и аккумулятора теплоты.

Поскольку в ИПСО преобразование энергии СИ в тепловую энергию происходит после его поступления в отапливаемое помещение, их тепловая эффективность существенно выше, чем у других активных и пассивных систем отопления, в частности, со стенами «Тромб – Мишель».

Следует отметить, что первые опыты по обогреву помещений посредством инсоляционной пассивной системы были проведены 86 лет назад в Узбекистане под руководством известного гелиотехника В.Б. Вейнберга [1]. По его проекту в местечке Капланбек вблизи Ташкента (ныне в Южно-Казахстанской области Республики Казахстан) было построено небольшое здание гелиотехнической лаборатории. Как показали результаты наблюдений В.Б. Вейнберга, в морозную солнечную погоду дополнительного отопления лаборатории не требовалось, но требовалось в пасмурную ветреную погоду, потому что иначе температура воздушной среды опускалась ниже комфортной. Это объясняется главным образом недостаточностью прихода СИ – основного энергоисточника, – плохим качеством постройки, большим значением отношения площади наружных ограждений к отапливаемому объему и резким континентальным климатом. Летом в здании лаборатории перегрев не наблюдался, так как благодаря высокому стоянию солнца над горизонтом в летнее время количество СИ, проникающего в помещение лаборатории через его СПО на южной стене, в 2–3 раза меньше, чем в зимнее время.

Несмотря на то, что ИПСО нашли широкое применение в высотных зданиях со сплошными частично лучепоглощающими СПО из тонированных стекол различных цветов (в качестве солнцезащитных элементов), на верандах и балконах жилых зданий, а также в оранжереях, исследованиям механизма формирования лучепоглощательной способности помещений, отапливаемых с помощью инсоляционных систем, не уделено должного внимания.

## Теоретический анализ и постановка задачи

Лучепоглощательная способность помещений с ИПСО ( $\alpha_{hp}$ ) представляет собой отношение потока поглощенного отапливаемым помещением СИ ( $Q_{abs_{hp}}$ ) к

поток СИ, прошедшего через его СПО ( $Q_{trns_{m_{te}}}$ ), то есть

$$(\alpha_{hp}) = \frac{Q_{abs_{hp}}}{Q_{trns_{m_{te}}}}, \quad (1)$$

и отличается от коэффициента поглощения рассматриваемого помещения  $\alpha_{hp}$  с учетом многократного внутреннего отражения диффузного излучения поверхностями элементов его интерьера (пол, стены, потолок и предметы мебелировки), которые имеют средневзвешенный коэффициент отражения СИ  $\rho_{hp}$  между собой, а также между последними и поверхностью СПО, имеющую отражательную способность ( $\rho_{te}^{dif}$ ).

Таким образом, задача определения лучепоглощательной способности ( $\alpha_{hp}$ ) сводится к установлению ее зависимости от  $\rho_{hp}$  и  $\rho_{te}^{dif}$ , а также от площадей поверхностей СПО ( $F_{te}$ ) и элементов интерьера ( $F_{int_r}$ ).

## Существующие подходы

Задача по определению лучепоглощательной способности плоских солнечных коллекторов (ПСК), для которых характерны равенство площадей поверхности их светопрозрачного покрытия (СП)  $F_{tc}$  и лучепоглощающей панели (ЛП)  $F_{lap}$ , а также чрезмерная малость толщины замкнутой воздушной прослойки, заключенной между поверхностями СП и ЛП ( $\delta_{al_{tc-lap}}$ ), по сравнению с длиной и шириной их корпусов, рассмотрены в работе [2]. В этой работе было получено выражение:

$$(\alpha_{lap}) = \frac{\alpha_{lap}}{1 - (1 - \alpha_{lap})(\rho_{te}^{dif})}, \quad (2)$$

где ( $\rho_{tc}^{dif}$ ) – способность СП корпуса ПСК отражать падающее на его внутреннюю поверхность диффузное СИ, ранее отраженное от поверхности ЛП рассматриваемого ПСК.

Знаменатель  $\left[ 1 - (1 - \alpha_{lap})(\rho_{te}^{dif}) \right]$  в формуле (2) учитывает влияние многократного внутреннего отражения диффузного СИ, отраженного от зачерненной поверхности ЛП ПСК, между поверхностями ЛП и СП корпуса ПСК на формирование ( $\alpha_{lap}$ ).

Лучепоглощательная способность полостных приемников (ПП) с открытой апертурой определяется с помощью следующего выражения [2]:



$$\alpha_{cr} = \frac{\alpha_{cr}}{\alpha_{cr} + (1 - \alpha_{cr}) \frac{F_a}{F_{cr}}} \quad (3)$$

Однако, по мнению авторов данной статьи, выражение (3) представлено некорректно, так как знаменатель  $\left[ \alpha_{cr} + (1 - \alpha_{cr}) \frac{F_a}{F_{cr}} \right]$ , как это следует из сопоставления его со знаменателем  $\left[ 1 - (1 - \alpha_{lap}) (\rho_{te}^{dif}) \right]$  в (2), по существу не отражает влияния многократного внутреннего отражения СИ между внутренними поверхностями стенок рассматриваемого ПП на формирование  $(\alpha_{cr})$ .

Кроме того, в работе [2] для определения поглощательной способности помещений с ИПСО на основе представления их как полостных приёмников СИ, входные отверстия (окна) которых снабжены одинарным или многослойным остеклением, предложено выражение:

$$(\alpha_{hp}) = \frac{\alpha_{hp}}{\alpha_{hp} + (1 - \alpha_{hp}) \tau_{dif} F_a + F_{hp}} \quad (4)$$

К сожалению, в выражении (4), как и в (3), допущены некорректности, значительно искажающие физическую картину процесса многократного внутреннего отражения и поглощения СИ в помещениях с ИПСО:

- знаменатель  $\left[ \alpha_{hp} + (1 - \alpha_{hp}) \tau_{dif} F_a + F_{hp} \right]$  в (4) не отражает сущность влияния многократного внутреннего отражения излучения в системе «СПО – ОП», так как его значения при реальных значениях  $\alpha_{hp}$  (как правило,  $\alpha_{hp} < 1$ ) больше единицы;

- из логических соображений в знаменателе выражения (4) вместо  $\tau_{dif}$  должна была быть  $(\rho_{te}^{dif})$ , так как последняя представляет собой способность СПО отражать диффузное СИ, ранее отраженное от поверхностей элементов интерьера ОП, а не пропускающую способность данного СПО;

- в представленном знаменателе (4) не соблюдается идентичность единице измерения членов, входящих в него: так, первый член  $\alpha_{hp}$ , как правило, безразмерный, в то время как второй  $(1 - \alpha_{hp}) \tau_{dif} F_a$  и третий  $F_{hp}$  члены имеют размерность,  $m^2$ .

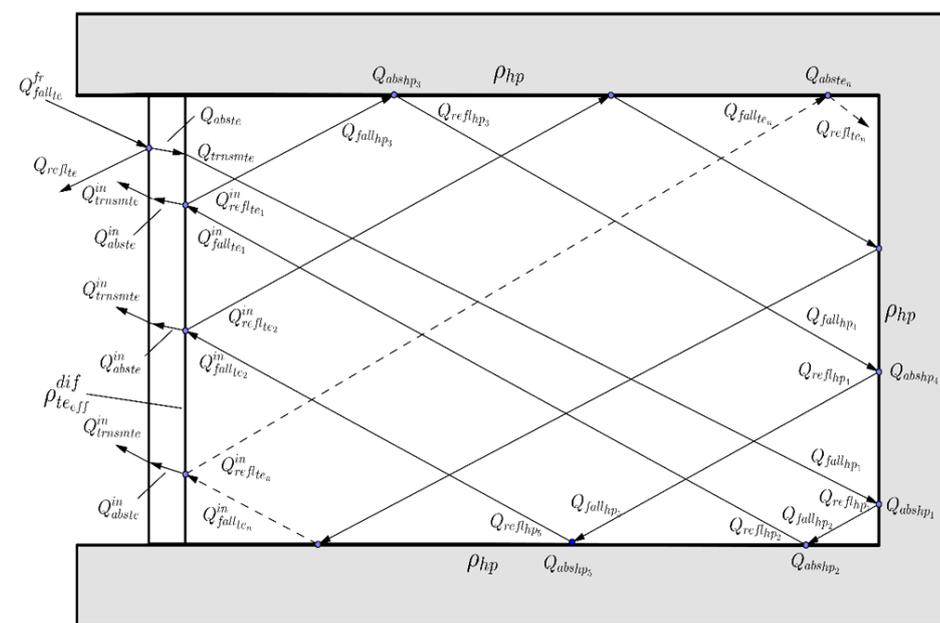
В связи с этим задача определения поглощательной способности помещений с ИПСО далее рассматривается более подробно.

### Предлагаемая модель

Принимаются следующие упрощающие допущения, не искажающие физическую сущность процесса многократного внутреннего отражения и поглощения СИ поверхностями элементов интерьера ОП:

- помещение с ИПСО представляется как ПСК, имеющий большую толщину воздушной прослойки между СП и ЛП;
- плотность потока СИ, прошедшего через СПО и входящего в ОП, изотропно распределена по поверхностям элементов его интерьера вследствие многократного внутреннего отражения;
- отражение СИ от поверхностей элементов интерьера ОП является диффузным.

Принципиальная схема прохождения СИ через СПО ОП, его многократного внутреннего отражения и поглощения поверхностями элементов интерьера ОП приведена на рисунке.



**Рис.** Принципиальная схема прохождения СИ через СПО ОП, его многократного внутреннего отражения и поглощения поверхностями элементов интерьера ОП  
**Fig.** Schematic diagram of solar radiation passing through translucent enclosure of heated premises, its multiple reflection and absorption of heated premises interior's elements surface



На фронтальную поверхность СПО, имеющего площадь  $F_{te}$ , падает поток СИ

$$Q_{fall_{te}}^{fr} = F_{te} q_{fall_{te}}^{fr} \quad (5)$$

Часть потока  $Q_{fall_{te}}^{fr}$ , а именно

$$Q_{refl_{te}} = (\rho_{te}) Q_{fall_{te}}^{fr}, \quad (6)$$

отражается от СПО назад (в сторону окружающей среды), а другая часть

$$Q_{abs_{te}} = (\alpha_{te}) Q_{fall_{te}}^{fr} \quad (7)$$

поглощается им. Оставшаяся часть

$$Q_{trmsm_{te}} = F_{te} q_{trmsm_{te}} = (\tau_{te}) Q_{fall_{te}}^{fr} = (\tau_{te}) F_{te} q_{fall_{te}} \quad (8)$$

проходит через СПО и поступает в отопляемое помещение.

В (7) и (8)  $(\rho_{te})$  и  $(\alpha_{te})$  – отражательная и поглощательная способности СПО ОП соответственно. В (8)  $q_{trmsm_{te}}$  – поверхностная плотность прошедшего через СПО и входящего в ОП СИ;  $\tau_{te}$  – приведенная (к единице площади фронтальной поверхности) пропускная способность СПО ОП.

В связи с тем что воздушная среда ОП является диатермической, значение  $Q_{trmsm_{te}}$  равно потоку СИ, однократно падающего на поверхности элементов интерьера (за исключением внутренней поверхности СПО) ОП ( $Q_{fall_{hp1}}^{in}$ ), то есть

$$Q_{trmsm_{te}} = Q_{fall_{hp1}} = F_{hp} q_{fall_{hp1}}, \quad (9)$$

где  $F_{hp}$  – общая площадь поверхностей элементов интерьера ОП (за исключением площади поверхности СПО);  $q_{fall_{hp1}}$  – поверхностная плотность потока СИ, однократно падающего на поверхности элементов интерьера ОП.

Из условия равенства значений  $Q_{trmsm_{te}}$  по выражениям (8) и (9)

$$q_{fall_{hp1}} = \frac{F_{te}}{F_{hp}} q_{trmsm_{te}} \quad (10)$$

Часть падающего на поверхности элементов интерьера ОП потока СИ ( $Q_{fall_{hp1}}$ )

$$Q_{abs_{hp1}} = \alpha_{hp} Q_{fall_{hp1}} = \alpha_{hp} F_{hp} q_{fall_{hp1}}, \quad (11)$$

поглощается поверхностями элементов интерьера ОП, а другая часть

$$Q_{refl_{hp1}} = \rho_{hp} Q_{fall_{hp1}} = \rho_{hp} F_{hp} q_{fall_{hp1}}, \quad (12)$$

отражается от них. В (11) и (12)  $\alpha_{hp}$  и  $\rho_{hp}$  – соответственно коэффициенты поглощения и отражения поверхности элементов интерьера ОП. Следует отметить, что из-за непрозрачности интерьера ОП для СИ

$$\alpha_{hp} + \rho_{hp} = 1. \quad (13)$$

Подставляя значения  $Q_{fall_{hp1}}$  из (9) в (11), получаем выражения для определения значения поглощенного поверхностями элементов интерьера ОП потока СИ при однократном поглощении падающего излучения, т.е.

$$Q_{abs_{hp1}} = \alpha_{hp} Q_{trmsm_{te}} \quad (14)$$

Теперь необходимо определить значения двукратно поглощенного поверхностями элементов интерьера ОП потока СИ ( $Q_{abs_{hp2}}$ ) при двукратном внутреннем отражении СИ между поверхностями элементов интерьера ОП.

Часть  $Q_{refl_{hp1}}$  в (12)

$$Q_{fall_{hp2}} = \rho_{hp} Q_{fall_{hp1}} = \rho_{hp} F_{hp} q_{fall_{hp1}}, \quad (15)$$

диффузно отражаясь от поверхностей элементов интерьера ОП, вновь падает на их поверхность, а другая часть

$$Q_{fall_{te}}^{in} = \rho_{hp} F_{te} q_{fall_{hp1}} \quad (16)$$

падает на внутреннюю (т.е. тыльную) поверхность СПО.

Часть  $Q_{fall_{te}}^{in}$

$$Q_{refl_{te}}^{in} = (\rho_{te}^{dif}) Q_{fall_{te}}^{in} = (\rho_{te}^{dif}) \rho_{hp} F_{te} q_{fall_{hp1}}, \quad (17)$$

отражаясь от СПО, возвращается назад и падает на поверхности элементов интерьера ОП.



В свою очередь часть  $Q_{fall_{te}}^{in}$

$$Q_{abs_{te}}^{in} = (\alpha_{te}^{dif}) Q_{fall_{te}}^{in}, \quad (18)$$

поглощается СПО, а другая часть

$$Q_{trmsm_{te}}^{in} = (\tau_{te}^{dif}) Q_{fall_{te}}^{in}, \quad (19)$$

проходит сквозь рассматриваемое СПО и уходит в сторону окружающей среды.

Таким образом, на поверхности элементов интерьера ОП падает двукратно внутренне отраженный поток СИ, равный сумме потоков  $Q_{fall_{hp2}}^{in}$  и  $Q_{refl_{te}}^{in}$ , то есть

$$Q_{fall_{hp2}} = Q_{fall_{hp2}}^{in} + Q_{refl_{te}}^{in}. \quad (20)$$

Часть  $Q_{fall_{hp2}}^{in}$

$$Q_{trmsm_{hp2}} = \alpha_{hp} Q_{fall_{hp2}}, \quad (21)$$

поглощается поверхностями элементов интерьера ОП и преобразуется в тепло, а другая часть

$$Q_{refl_{hp2}} = \rho_{hp} Q_{fall_{hp2}}, \quad (22)$$

отражается от них.

Подставляя значения  $Q_{fall_{hp2}}^{in}$  из (15) и  $Q_{refl_{te}}^{in}$  из (17) в (20) с учетом значений  $Q_{fall_{hp1}}$  по (10) и  $Q_{trmsm_{te}}$  по (9), получаем

$$Q_{abs_{hp2}} = \alpha_{hp} \left[ \rho_{hp} (1 + (\rho_{te}^{dif})) \frac{F_{te}}{F_{hp}} \right] Q_{trmsm_{te}}. \quad (23)$$

Аналогичным образом устанавливаем соответствующие выражения для определения значений поглощенных поверхностями элементов интерьера ОП потоков СИ после трехкратного ( $Q_{abs_{hp3}}$ ), четырехкратного ( $Q_{abs_{hp4}}$ ) и многократного ( $Q_{abs_{hp_n}}$ ) внутренних отражений СИ между ними, то есть

$$Q_{abs_{hp3}} = \alpha_{hp} \left[ \rho_{hp} (1 + (\rho_{te}^{dif})) \frac{F_{te}}{F_{hp}} \right]^2 Q_{trmsm_{te}}; \quad (24)$$

$$Q_{abs_{hp4}} = \alpha_{hp} \left[ \rho_{hp} (1 + (\rho_{te}^{dif})) \frac{F_{te}}{F_{hp}} \right]^3 Q_{trmsm_{te}}; \quad (25)$$

$$Q_{abs_{hp_n}} = \alpha_{hp} \left[ \rho_{hp} (1 + (\rho_{te}^{dif})) \frac{F_{te}}{F_{hp}} \right]^{n-1} Q_{trmsm_{te}}. \quad (26)$$

Значение  $Q_{abs_{hp}}$  в отношении (1) определяется суммированием значений  $Q_{abs_{hp1}}$  по (14),  $Q_{abs_{hp2}}$  по (23),  $Q_{abs_{hp3}}$  по (24),  $Q_{abs_{hp4}}$  по (25) и...  $Q_{abs_{hp_n}}$  по (26):

$$Q_{abs_{hp}} = Q_{abs_{hp1}} + Q_{abs_{hp2}} + Q_{abs_{hp3}} + Q_{abs_{hp4}} + \dots + Q_{abs_{hp_n}}. \quad (27)$$

Подставляя значения  $Q_{abs_{hp1}}$  из (14),  $Q_{abs_{hp2}}$  из (23),  $Q_{abs_{hp3}}$  из (24),  $Q_{abs_{hp4}}$  из (25),...,  $Q_{abs_{hp_n}}$  из (26) в (27), получаем

$$Q_{abs_{hp_n}} = \alpha_{hp} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \rho_{hp} (1 + (\rho_{te}^{dif})) \frac{F_{te}}{F_{hp}} \right]^{n-1} Q_{trmsm_{te}}. \quad (28)$$

Если учесть, что

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left[ \rho_{hp} (1 + (\rho_{te}^{dif})) \frac{F_{te}}{F_{hp}} \right]^{n-1} = \frac{1}{1 - \rho_{hp} (1 + (\rho_{te}^{dif})) \frac{F_{te}}{F_{hp}}} \quad (29)$$

то решение (29) можно представить в виде:

$$Q_{abs_{hp}} = \frac{\alpha_{hp}}{1 - \rho_{hp} (1 + (\rho_{te}^{dif})) \frac{F_{te}}{F_{hp}}} Q_{trmsm_{te}}. \quad (30)$$

Подставляя значение  $Q_{abs_{hp}}$  из (30) в отношение (1), получаем

$$(\alpha_{hp}) = \frac{\alpha_{hp}}{1 - \rho_{hp} (1 + (\rho_{te}^{dif})) \frac{F_{te}}{F_{hp}}}. \quad (31)$$

И, наконец, подставляя значение  $\rho_{hp}$  из (13) в решение (31), получаем выражения для определения значения эффективной поглощательной способности помещения с ИПСО:



$$(\alpha_{hp}) = \frac{\alpha_{hp}}{\alpha_{hp} - (1 - \alpha_{hp})(\rho_{te}^{dif})} \frac{F_{te}}{F_{hp}} \quad (32)$$

Наряду с установлением корректного расчетного выражения для определения поглощательной способности СИ помещений с ИПСО ( $\alpha_{hp\text{eff}}$ ) интересно установить аналогичное выражение для определения приведенной поглощательной способности ( $\tau_{te}\alpha_{hp}$ ), которая представляет собой оптическую эффективность системы «СПО-ОП».

Значение ( $\tau_{te}\alpha_{hp}$ ), как правило, определяется из отношения потока поглощенного ОП СИ ( $Q_{abs_{hp}}$ ) к потоку СИ, падающего на фронтальную поверхность его СПО ( $Q_{fall_{hp}}^{fr}$ ), то есть

$$(\tau_{te}\alpha_{hp}) = \frac{Q_{abs_{hp}}}{Q_{fall_{te}}^{fr}} \quad (33)$$

Подставляя значение  $Q_{abs_{hp}}$  из (30) и  $Q_{fall_{hp}}^{fr}$  из (8) в отношение (33), получаем

$$(\tau_{te}\alpha_{hp}) = \tau_{te} \frac{\alpha_{hp}}{\alpha_{hp} - (1 - \alpha_{hp})(\rho_{te}^{dif})} \frac{F_{te}}{F_{hp}} \quad (34)$$

При  $F_{te} \approx F_{hp}$  выражение (34) примет вид:

$$(\tau_{te}\alpha_{hp}) = \tau_{te} \frac{\alpha_{hp}}{\alpha_{hp} - (1 - \alpha_{hp})(\rho_{te}^{dif})} \quad (35)$$

который представляет собой приведенную поглощательную способность ИПСО со стеной «Тромба – Мишеля» и ПСК для нагрева жидких и газообразных теплоносителей, что подтверждает достоверность предложенной оптической модели помещений с ИПСО.

Значение  $\tau_{te}$  в (34) с учетом коэффициента пропускания СИ рамы (переплета) СПО ( $\tau_{cr}$ ), пропускательной способности СИ материала его светопрозрачного покрытия ( $\tau_t$ ) и коэффициента пропускания слоя пыли и грязи на наружной и внутренней поверхностях светопрозрачного покрытия ( $\tau_{dd}$ ) в общем виде для прямого и диффузного СИ может быть определено из выражения [3]:

$$(\tau_{te}) = \tau_{cr} + \tau_{dd}(\tau_t) - 1. \quad (36)$$

В (36) значение ( $\tau_t$ ) однослойного светопрозрачного покрытия с учетом многократного внутреннего отражения и поглощения проходящего между границами разделов СИ определяется из выражения [4]:

$$(\tau_t)_1 = \frac{(1 - \rho_{te})^2(1 - \alpha_{te})}{1 - \rho_{te}^2(1 - \alpha_{te})^2} \quad (37)$$

Для двух- и трехслойного СПО, отдельные слои которых неоднородны по оптическим свойствам и разделены между собой воздушными прослойками, значения ( $\tau_t$ ) могут быть определены из выражений [5]:

$$(\tau_t)_2 = \frac{(\tau_{t_1})(\tau_{t_2})}{1 - (\rho_{t_1})(\rho_{t_2})} \quad (38)$$

$$(\tau_t)_3 = \frac{(\tau_{t_1})(\tau_{t_2})(\tau_{t_3})}{[1 - (\rho_{t_1})(\rho_{t_2})][(\rho_{t_1})(\rho_{t_3})] - (\rho_{t_2})(\rho_{t_3})(\tau_{t_1})} \quad (39)$$

В (37), (38) и (39) нижние индексы в  $(\tau_t)_1$ ,  $(\tau_t)_2$  и  $(\tau_t)_3$  обозначают число слоев в СПО, а в  $(\tau_{t_1})$ ,  $(\tau_{t_2})$  и  $(\tau_{t_3})$ ,  $(\rho_{t_1})$ ,  $(\rho_{t_2})$  и  $(\rho_{t_3})$  – нумерацию слоев СПО, начиная с наружного слоя светопрозрачных покрытий.

### Анализ и обсуждение полученных результатов

Знаменатель выражения (32)

$$\left[ \alpha_{hp} - (1 - \alpha_{hp})(\rho_{te}^{dif}) \frac{F_{te}}{F_{hp}} \right], \text{ как и знаменатель (2)}$$

$\left[ 1 - (1 - \alpha_{hp})(\rho_{te}^{dif}) \right]$ , учитывает влияние многократного внутреннего отражения диффузного СИ между поверхностями элементов интерьера ОП на формирование его поглощательной способности. В связи с тем, что для элементов интерьера ОП значения  $\alpha_{hp} < 1$  и  $\frac{F_{te}}{F_{hp}} < 1$ , значение знаменателя (34)

$$\left[ \alpha_{hp} - (1 - \alpha_{hp})(\rho_{te}^{dif}) \frac{F_{te}}{F_{hp}} \right] \text{ всегда меньше единицы.}$$

Например, для ОП с трехслойным СПО при  $\alpha_{hp} = 0,45$  и  $(\rho_{te}^{dif}) = 0,29$  [2],  $\frac{F_{te}}{F_{hp}} = 0,05$  значение

$$\text{знаменателя } \left[ \alpha_{hp} - (1 - \alpha_{hp})(\rho_{te}^{dif}) \frac{F_{te}}{F_{hp}} \right] \text{ равно } 0,4420.$$



Значение поглощательной способности рассматриваемого ОП составляет 1,018. При  $\frac{F_{te}}{F_{hp}} \rightarrow 0$  значение ( $\alpha_{hp}$ ), как и ожидалось, стремится к единице. Значение приведенной поглощательной способности рассматриваемого ОП ( $\tau_{te}\alpha_{hp}$ ), то есть оптической эффективности системы «СПО-ОП», при  $\tau_{te} = 0,6$  (для трехслойного СПО), составляет 0,61, что почти в два раза больше, чем у традиционных активных и пассивных систем солнечного отопления.

### Выводы

В статье была рассмотрена задача определения поглощательной способности помещений с ИПСО на основе реализации оптической модели системы, предложенной авторами. Показана некорректность существующих зависимостей по решению данной задачи.

Установлены расчетные выражения для определения поглощательной способности ОП и на ее основе приведенной поглощательной способности помещений с ИПСО, в которых учтено многократное внутреннее отражение СИ между поверхностями элементов интерьера ОП.

Показано, что в реальных условиях значение приведенной поглощательной способности помещений с ИПСО с трехслойным СПО составляет 0,61.

### Список литературы

1. Вейнберг, В.Б. Оптика в установках для использования солнечной энергии / В.Б. Вейнберг // М.: Оборонгиз, 1959. – С. 224.
2. Duffie, J.A. Solar Engineering of Thermal Processes / J.A. Duffie, W.A. Beckman // Fourth Edition. –

Hoboven New Jersey: John Wiley Sons. Inc., – 2013. – P. 910.

3. Аvezов, Р.Р. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения / Р.Р. Аvezов, А.Ю. Орлов // Ташкент: Фан, 1988. – С. 288.

4. Баум, В.А., Технические характеристики солнечных водоопреснителей парникового типа. Теплоэнергетика. Выпуск 2. «Использование солнечной энергии» / В.А. Баум // М.: Изд. АН СССР, 1960. – С. 122–132.

5. Avezov, R.R. Technique for Calculating of Optical Characteristics of Two- and Three-Layer Light Transmissive Screens in Insulating Passive Solar Heating Systems / R.R. Avezov, K.A. Samiev // Applied Solar Energy. – 2006. – Vol. 42. – No. 3. – P. 45–49.

### References

1. Veinberg V.B. Optika v ustanovkakh dlâ ispol'zovaniâ solnečnoj ènergii. Moscow: Oborongiz, 1959 (in Russ.).

2. Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4<sup>th</sup> Edition. – Hoboven New Jersey: John Wiley Sons. Inc., 2013 (in Eng.).

3. Avezov R.R., Orlov A.Yu. Solneçnye sistemy otopleniâ i gorâçego vodosnabženiâ. Tashkent: Fan, 1988 (in Russ.).

4. Baum V.A., Tehniçeskie harakteristiki solneçnyh vodoopresnitelej parnikovogo tipa. Теплоэнергетика. Iss. 2. “Ispol'zovanie solnečnoj ènergii”. Moscow: Izd. ANSSSR Publ., 1960, pp.122–132 (in Russ.).

5. Avezov R.R., Samiev K.A. Technique for Calculating of Optical Characteristics of Two- and Three-Layer Light Trans-missive Screens in Insulating Passive Solar Heating Systems. *Applied Solar Energy*. 2006;(42/3):45–49 (in Eng.).

Транслитерация по ISO 9:1995

