

А.П. ДАВИДЕНКО, канд. техн. наук, профессор НТУ "ХПИ"

В.В. ЛЫСЕНКО, зав. лаб. НТУ "ХПИ"

М.Б. МАРАХОВСКИЙ, канд. техн. наук, доц. НТУ "ХПИ"

А.О. ОСТРОЖИНСКИЙ, студент НТУ "ХПИ"

М.В. ТРОХИН, научн. сотрудник НТУ "ХПИ"

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СИЛИКАТНОГО СТЕКЛА И ПОЛИКАРБОНАТА В ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОМ КОЖУХЕ ГЕЛИОКОЛЛЕКТОРА

Найпоширенішим технічним рішенням, яке виконує перетворення сонячної енергії в теплову, є геліоколектор. В конструкції його основних видів, що представлені на ринку, використовуються такі матеріали, як силікатне скло та полікарбонат. На підставі інформації, яку надають виробники, проведено математичне моделювання процесу проходження сонячного випромінювання крізь ці матеріали та порівнювальний аналіз, що враховує характеристики спектру сонячного випромінювання в усьому діапазоні довжин хвиль. Результати моделювання наведені в статті.

One of the most widespread technical decisions, executing transformation of sun energy to heat, there is solar thermal collector. In the construction of his basic kinds, presented at the market, such materials, as silicate glass and polycarbonate, are utilized. On the basis of information, given by producers, the mathematical design of process of passing of sun radiation through these materials and a comparative analysis, taking into account descriptions of spectrum of sun radiation in all of range of lengths of waves, was constructed. Design results are presented in this article.

Постановка проблеми. Одним из самых эффективных способов использования солнечной энергии является преобразование её в тепловую, а самое распространённое техническое решение, реализующее это преобразование – гелиоколектор. Основными видами, представленными на рынке гелиоколекторов являются: вакуумный с тепловой трубой, плоскокондуктивный и каналный. Конструкция последних двух предусматривает наличие теплоизоляционного кожуха, который должен пропускать солнечную энергию с освещаемой солнцем стороны и препятствовать передаче тепла от гелиоколектора окружающей среде. Чаще всего в качестве прозрачного для солнца покрытия используется силікатне скло, но некоторые производители используют сотовый полікарбонат [1].

Поликарбонат (далее ПК) – бесцветная прозрачная масса с температурой размягчения (180 – 300)°С (в зависимости от метода получения); имеет высокую теплостойкость – до 153°С, термостойкие марки (РС – НТ), представляющие собой сополимеры, выдерживают температуру до (160 – 205)°С; обладает высокой жесткостью в сочетании с очень высокой стойкостью к ударным воздействиям, в том числе при повышенной и пониженной температуре, выдерживает циклические перепады температур от –253°С до +100°С. Базовые марки ПК имеют высокий коэффициент трения, высокую размерную стабильность, незначительное водопоглощение, нетоксичны, подвергаются

стерилизации и имеют отличные диэлектрические свойства. ПК допускает пайку, обладает хорошими оптическими свойствами, чувствителен к остаточным напряжениям: детали с высокими остаточными напряжениями легко растрескиваются при действии бензина, масел. Выпускается как монолитный лист или как сотовая многослойная структура [2].

Целью данной статьи является освещение результатов сравнительного анализа силикатного стекла (далее СС) и сотового ПК в конструкции теплоизоляционного кожуха гелиоколлектора, проведенного коллективом авторов. Анализ проводился путём математического моделирования процесса прохождения солнечного излучения сквозь слой СС и ПК на основании информации, предоставляемой производителями данной продукции.

Анализ литературы. В рассмотренной литературе [1], [3], [8] приводится общая методика проведения анализа оптических свойств материалов, но, к сожалению, не приводится сравнительный анализ силикатного стекла и поликарбоната.

Для анализа способности материала пропускать солнечное излучение необходимо, прежде всего, оценить потенциальные энергетические возможности солнечного излучения. Здесь наибольшее значение имеет его общая удельная мощность у поверхности Земли и распределение этой мощности по разным диапазонам излучения [3].

Солнце. Мощность излучения Солнца, находящегося в зените, у поверхности Земли оценивается примерно в $1,35 \text{ кВт/м}^2$. Конечно, даже небольшая облачность резко уменьшает количество энергии, достигающее поверхности, особенно в инфракрасном (тепловом) диапазоне. Тем не менее, часть энергии всё равно проникает сквозь облака. В средней полосе при сильной облачности в полдень мощность солнечного излучения, дошедшего до поверхности Земли, оценивается примерно в 100 Вт/м^2 , и лишь в крайне редких случаях при особо плотной облачности может опускаться ниже этой величины. Общепринято при измерениях принимать стандартное значение на уровне 1 кВт/м^2 .

Другим важным параметром является распределение интенсивности солнечного излучения по длинам волн, т.е. спектральный состав солнечного света. Этот спектр является практически непрерывным в крайне широком диапазоне частот – от низкочастотного радиоволнового до сверхвысокочастотного рентгеновского и гамма-излучения. Одинаково эффективно улавливать столь разные виды излучения невозможно (пожалуй, это можно осуществить лишь теоретически с помощью абсолютно чёрного тела). Но в этом нет необходимости: во-первых, интенсивность солнечного излучения в разных частотных диапазонах различна, а во-вторых, не всё, что излучило Солнце, достигает поверхности Земли – отдельные участки спектра в значительной степени поглощаются разными компонентами атмосферы – преимущест-

венно озоном, парами воды и углекислым газом. Для характеристики этого процесса введено понятие «воздушной массы» ($AM - Air Mass$). Так спектральный состав излучения с воздушной массой $AM0$ соответствует спектру солнечного света за пределами атмосферы Земли; $AM1$ соответствует излучению на поверхности Земли при условии, что Солнце находится строго над точкой наблюдения, т.е. лучи света прошли сквозь 1 атмосферу. При измерениях стандартом является $AM1,5$, соответствующий солнечному излучению, которое прошло 1,5 атмосферы (угол падения солнечного света 48°) [4].

Зависимость распределения энергии от длины волны для солнечного излучения по данным справочника по геофизике и космическому пространству под редакцией С.Л. Валлея и МакГроу-Хилла [5] приведена на рис. 1.

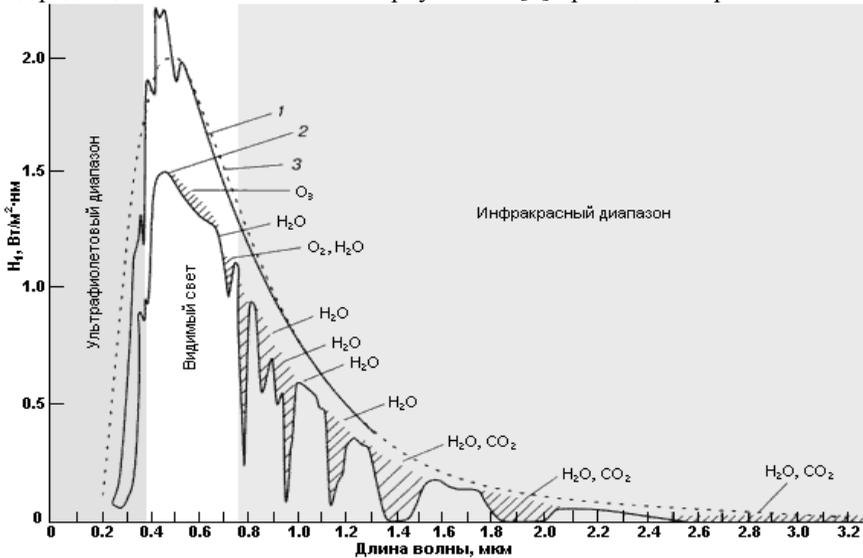


Рис. 1. Удельная мощность падающего на Землю солнечного излучения (H_1) в зависимости от длины волны. Заштрихованные области соответствуют участкам спектра, ненаблюдаемым на уровне моря из-за их поглощения указанными компонентами атмосферы: 1 – удельная мощность солнечного излучения за границей атмосферы, 2 – удельная мощность солнечного излучения на уровне моря ($AM1,5$), 3 – удельная мощность излучения абсолютно черного тела при 5900 К

Диапазоном видимого света считается участок длин волн от 380 нм (глубокий фиолетовый) до 760 нм (глубокий красный). Всё, что имеет меньшую длину волны, обладает более высокой энергией фотонов и подразделяется на ультрафиолетовый, рентгеновский и гамма-диапазоны излучения. Невзирая на высокую энергию фотонов, самих фотонов в этих диапазонах не так уж много, поэтому общий энергетический вклад этого участка спектра весьма мал. Всё, что имеет большую длину волны, обладает меньшей по сравнению с видимым светом энергией фотонов и подразделяется на инфра-

красный диапазон (тепловое излучение) и различные участки радиодиапазона.

Для того чтобы получить возможность количественной оценки энергии Солнца, приходящейся на различные участки длин волн, график, изображенный на рис. 1, необходимо преобразовать в функциональную зависимость, которую в дальнейшем можно обрабатывать, используя математический аппарат. Для этой цели в среде Mathcad разработан алгоритм, позволяющий получить функциональную зависимость на основании графического изображения. График функции, полученной в результате, приведен на рис. 2.

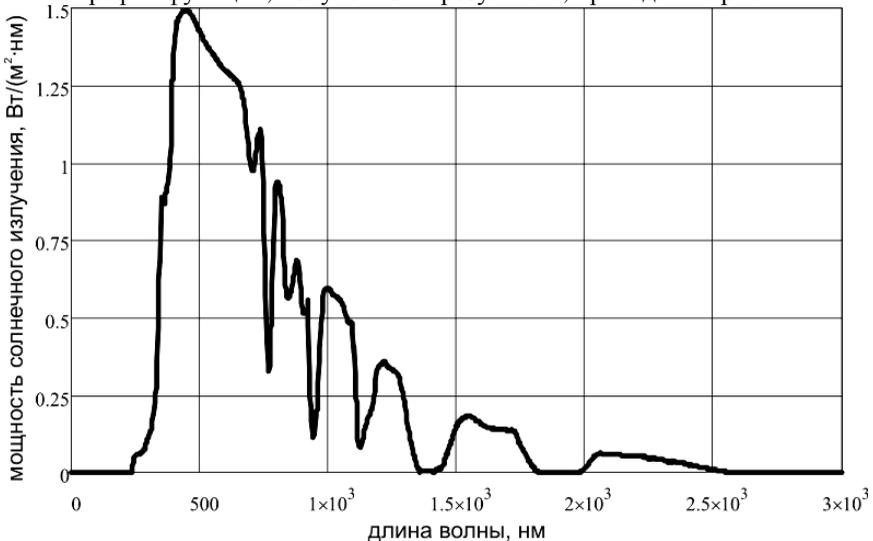


Рис. 2. Удельная мощность солнечного излучения в зависимости от длины волны, построенная в пакете *Mathcad*

Интегрируя полученную функцию удельной мощности солнечного излучения по длине волны ($H(\lambda)$), получим мощность солнечного излучения, приходящуюся на 1 м^2 поверхности в диапазоне длин волн, соответствующих пределам интегрирования. Поскольку многие производители указывают степень проницаемости прозрачных материалов только для видимого диапазона света, то целесообразно определить, какая часть солнечной энергии приходится на него. Для этого интегрируем функцию $H(\lambda)$ во всём диапазоне длин волн, чтобы определить суммарную мощность солнечного излучения, приходящуюся на 1 м^2 Земли, а затем соотносим её с мощностью солнечного излучения, приходящуюся на диапазон волн от 380 до 760 нм.

$$P_{\Sigma} = \int_0^{\infty} H(\lambda) d\lambda = 839,78,$$

$$\frac{\int_{360}^{780} H(\lambda)d\lambda}{P_{\Sigma}} = 0,576,$$

где P_{Σ} – мощность солнечного излучения, Вт/м², $H(\lambda)$ – зависимость мощности солнечного излучения от длины волны Вт/(м²·нм).

Таким образом получаем, что, согласно использованного в расчётах графика, мощность солнечного излучения на уровне моря составляет около 840 Вт/м² из которых на видимый диапазон приходится только 57,5 %. Это говорит о том, что сравнение СС и ПК в качестве прозрачного покрытия теплоизоляционного кожуха гелиоколлектора по показателю проницаемости для видимого света некорректно, поскольку даёт большую погрешность. Сравнивать нужно проницаемость во всём диапазоне длин волн, причём нельзя использовать интегральные показатели, поскольку спектр солнечной энергии, приходящей на поверхность Земли, неоднороден.

Поликарбонат. Многие коммерческие организации, в качестве наглядной иллюстрации высокой степени прозрачности ПК, приводят график зависимости его пропускающей способности от длины волны. Эти графики несколько отличаются у разных производителей, но, в целом, достаточно схожи друг с другом и имеют следующий вид [6] (рис. 3).

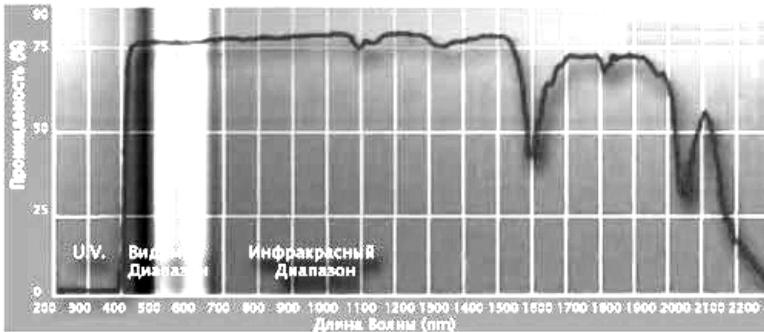


Рис. 3. Коммерческий график зависимости пропускающей способности ПК от длины волны

График функции, полученной в результате обработки пакетом *Mathcad* рис. 3, приведен на рис. 4.

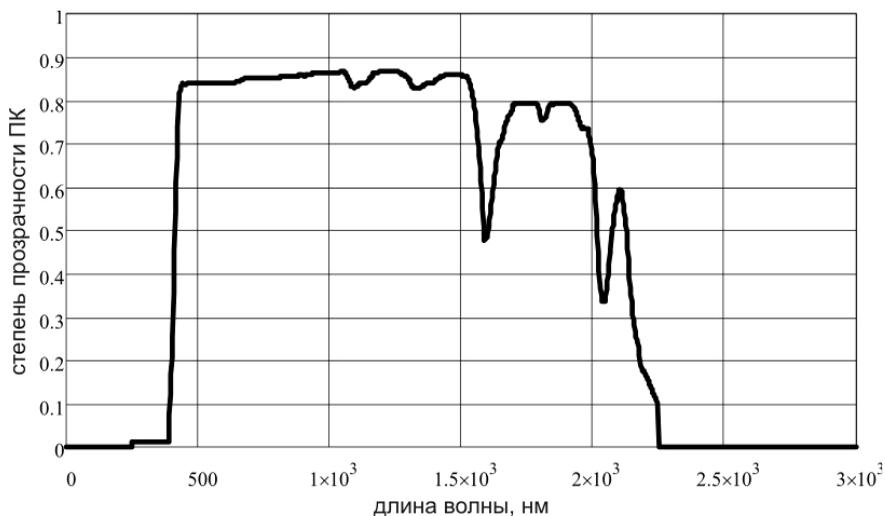


Рис. 4. Зависимость пропускающей способности ПК от длины волны, построенная в пакете *Mathcad*

Следует отметить, что данные, приведенные на графике (рис. 3) не соответствуют результатам испытания ПК по *ASTMD-1003*, согласно которым проникаемость монолитного ПК толщиной 3 мм для света достигает 88 %. Поэтому функция была масштабирована по вертикали так, что бы в середине видимого участка длин волн её амплитуда была равна 85 % (средний показатель для ПК).

Силикатное стекло – очень распространённый материал, известный уже много сотен лет, но основные данные, относительно зависимости его пропускающей способности от длины волны, встречающиеся в литературе, касаются ультрафиолетовой части спектра, поскольку этот параметр важен в медицинской оптике. Более-менее подробно описана пропускающая способность СС и в видимой части спектра, что же касается инфракрасной области, то все данные носят приблизительный характер. Скорее всего, это обусловлено тем, что данный параметр не нормируется в процессе производства. За основу, но с некоторыми коррективами, для построения модели в рамках настоящего сравнения были взяты следующие графики зависимостей [7] (рис. 5).

Внесенные коррективы, касаются инфракрасной области спектра. Дело в том, что во многих источниках говорится о том, что в диапазоне (2000 – 3000) нм у СС резко снижается пропускная способность, а простейший опыт с источником инфракрасного излучения и тепловизором показывает, что уже при длине волны 2300 нм стекло фактически не пропускает электромагнит-

ное излучение [8]. График функции, полученный склеиванием графиков рис. 5а и рис. 5б с последующей коррекцией в инфракрасной области, показан на рис. 6.

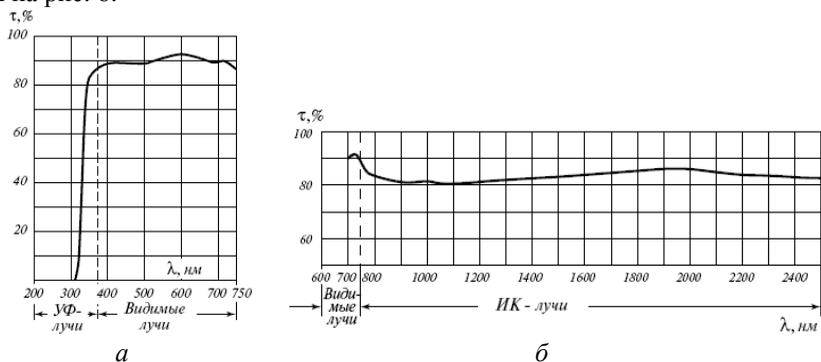


Рис. 5. Зависимость пропускающей способности СС от длины волны; а – в ультрафиолетовой и видимой областях спектра, б – в инфракрасной области спектра

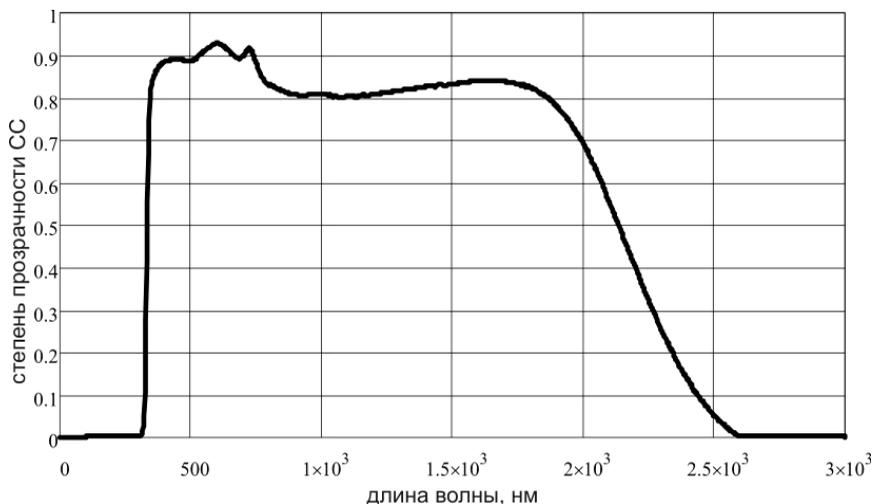


Рис. 6. зависимость пропускающей способности СС от длины волны, использованная для построения модели в пакете *Mathcad*

Сравнительный анализ СС и ПК в конструкции теплоизоляционного кожуха гелиоколлектора. Предварительный сравнительный анализ можно провести, совместив полученные графики (рис. 2, рис. 4, рис. 6) в одних осях координат. Такой комплексный график представлен на рис. 7.

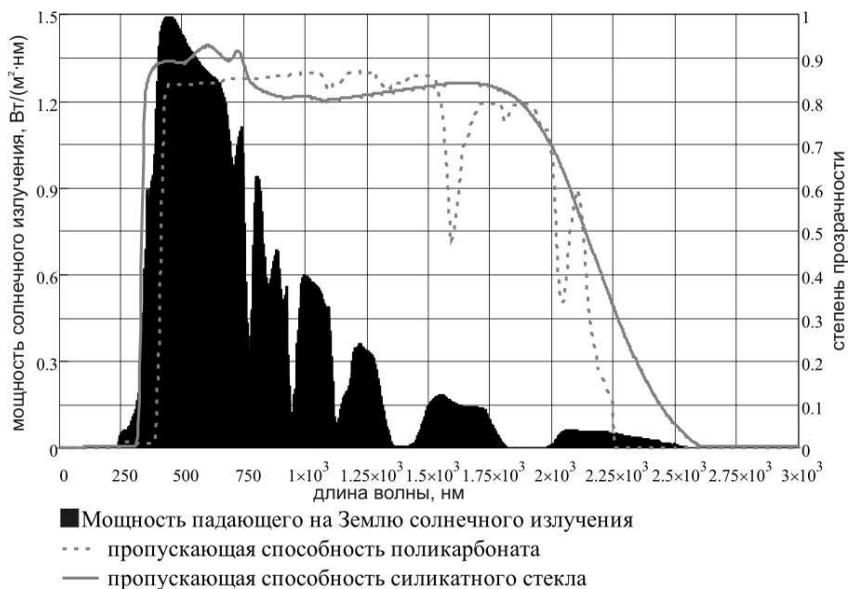


Рис. 7. Пропускающая способность ПК и СС на фоне удельной мощности солнечного излучения в зависимости от длины волны

Для того, что бы получить удельную мощность прошедшего сквозь ПК или СС солнечного излучения в зависимости от длины волны нужно умножить функцию зависимости удельной мощности солнечного излучения ($H(\lambda)$) на зависимость пропускающей способности ПК и СС соответственно. В результате получим график, изображенный на рис. 8.

Для того, что бы узнать, какую часть энергии солнца пропускает ПК и СС, нужно интегрировать удельную мощность солнечного излучения прошедшего сквозь ПК $P_{ПК}(\lambda)$ и СС $P_{СС}(\lambda)$ во всём диапазоне длин волн, а потом разделить на мощность солнечного излучения P_{Σ} . Таким образом, для ПК получим:

$$\frac{\int_0^{\infty} P_{ПК}(\lambda) d\lambda}{P_{\Sigma}} = 0,742, \text{ т.е. ПК пропускает около 75 \% солнечного излучения.}$$

Для СС:

$$\frac{\int_0^{\infty} P_{СС}(\lambda) d\lambda}{P_{\Sigma}} = 0,846, \text{ т.е. СС пропускает около 85 \% солнечного излучения.}$$

Проведенные расчёты говорят о том, что ПК пропускает на 10 % меньше солнечного излучения, чем СС. 3,2 % этой разницы приходится на ультрафиолетовую часть спектра:

$$\frac{\int_0^{380} [P_{CC}(\lambda) - P_{ПК}(\lambda)] d\lambda}{P_{\Sigma}} = 0,032,$$

а 7,1 % на видимую часть спектра:

$$\frac{\int_{380}^{760} [P_{CC}(\lambda) - P_{ПК}(\lambda)] d\lambda}{P_{\Sigma}} = 0,071,$$

В инфракрасном диапазоне различия между ПК и СС незначительны.

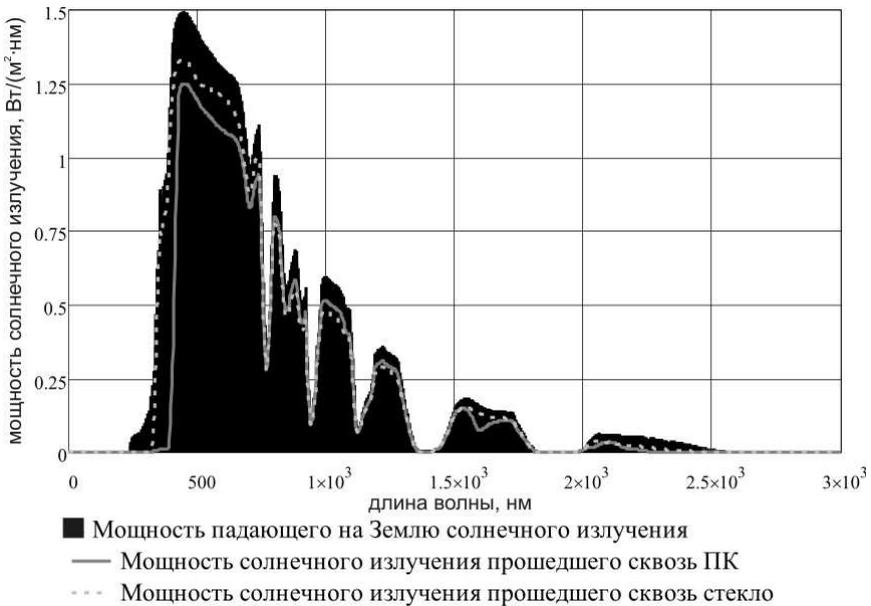


Рис. 8. Удельная мощность солнечного излучения прошедшего сквозь ПК и СС в зависимости от длины волны

Выводы. Часть не прошедшего солнечного излучения будет отражаться от поверхности материала, а часть поглощаться в объёме и приводить к нагреву покрытия. Таким образом, считать всю энергию солнца не прошедшую сквозь покрытие утраченной некорректно. Нагреваясь, материал будет излучать энергию в объём теплоизоляционного кожуха, тем самым, передавая её

гелиоколлектору. Построение математической модели этого процесса и рассмотрение свойств материалов с точки зрения тепловой изоляции внутреннего объёма кожуха является темой дальнейших исследований. Так же нужно обратить внимание на то, что полученные результаты расчётов носят приближенный характер. Это обусловлено рядом причин: неточность и низкая разрешающая способность исходных графиков, использованных в расчёте; несоответствие графиков интегральным показателям, полученным для этих же материалов, и различие характеристик материалов у разных производителей. Поэтому данное исследование требует экспериментального подтверждения, которое планирует провести коллектив авторов.

Список литературы: 1. Бараночников М.Л. Приёмники инфракрасного излучения. Состояние разработок и промышленного выпуска, перспективы развития прогнозы / М.Л. Бараночников. – М., 1985. – 94 с. 2. Plastinfo. Поликарбонаты (ПК) : характеристика, способы получения, технология переработки, области применения [Электронный ресурс] / Режим доступа к ресурсу.: <http://www.plastinfo.ru/information/articles/44/> 3. Бухитаб М.А. Измерение малых оптических потерь / М.А. Бухитаб. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 156 с. 4. «Солнечная энергетика». Основы технологии солнечных элементов. Тестирование [Электронный ресурс] / Режим доступа к статье.: http://solareview.blogspot.com/2009/07/blog-post_28.html. 5. Справочник по геофизике и космическому пространству. / С.Л. Валей, МакГроу-Хилл – Нью-Йорк, 1965. 6. "ВМТ-Н" ООО. Каталог товаров (Сотовый поликарбонат) [Электронный ресурс] / Режим доступа к ресурсу.: http://www.alucomposite-nsk.ru/item_94/. 7. Склоресурс. Скло і сонячна радіація [Электронный ресурс] / Режим доступа до статті.: <http://skloresurs.com.ua/readinfo/ua/6/>. 8. Эпштейн М.И. Измерения оптического излучения в электронике / М.И. Эпштейн. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 253 с.

Статья представлена д.т.н. проф. НТУ «ХПИ» Кондрашовым С.И.

Поступила в редакцию 12.03.2010