

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СОЛНЕЧНОГО КОЛЛЕКТОРА С РЕЗУЛЬТАТАМИ РАСЧЕТА ПО ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКЕ

Милуков Павел Александрович

Преподаватель, Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск
Pavel-milukov@mail.ru

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF THE STUDY A COMPUTER MODEL OF A SOLAR COLLECTOR WITH CALCULATION RESULTS BY THE PROPOSED METHOD

P. Milyukov

Summary. With the help of the SolidWorks numerical simulation program (SW), a series of analyses was performed in the Flow Simulation program module using the finite element method. The aim of the work was to compare the results of calculating the mathematical model according to the proposed method with the results of the analysis carried out in SW Flow Simulation. All initial data and results of calculations and analysis of the model are presented in tables. The analysis showed results close to the results of the mathematical model, it should be emphasized that the increase in efficiency depends on the properties of materials used in the design of solar collectors. The analysis did not take into account the external environment (cloud cover). The horizontal position of the solar collector contributed to the fact that solar radiation was received by the SC for a longer time. The specified time interval in the experiment is from 12.00 to 15.00 hours.

Keywords: solar collector, heat transfer, model, solar radiation, thermal conductivity, analysis.

Аннотация. С помощью программы численного моделирования SolidWorks (SW) было проведена серия анализов в модуле программы Flow Simulation методом конечных элементов. Целью работы являлось, сравнить результаты расчета математической модели по предложенной методике, с результатами анализа, проводимого в SW Flow Simulation. Все исходные данные и результаты проводимых подсчетов, и анализа над моделью, представлены в таблицах. Анализ показал результаты близкие к результатам математической модели, нужно подчеркнуть, что повышение КПД зависит от свойств материалов, используемых в проектировании солнечных коллекторов. В анализе не учитывалась внешняя среда (облачность). Горизонтальное положение солнечного коллектора способствовало тому, что солнечное излучение принималось СК в течение большего времени. Заданный временной отрезок в эксперименте с 12.00 до 15.00 часов.

Ключевые слова: солнечный коллектор, теплообмен, модель, солнечное излучение, теплопроводностью, анализ.

Одним из наиболее эффективных приборов, преобразующих солнечную энергию, является солнечный коллектор, который преобразовывает солнечное излучение в тепловую энергию для использования в коммунальных и бытовых нуждах населения. Может использоваться как основной или дополнительный нагреватель в системе горячего водоснабжения.

Предлагаемое конструкционное решение плоского солнечного коллектора (ПСК) упрощенно (рис. 1).

1. Корпус (алюминий, $\delta=2$ мм);
2. Стекло с высокой пропускной способностью;
3. Стекло с высокой пропускной способностью;
4. Абсорбер (медь) с покрытием, имеющим высокое светопоглощение;

Таблица 1. Общие характеристики

Название	Параметры
Общая площадь	2.42 м ²
Рабочая площадь	2.15 м ²
Длина	2.226 мм
Ширина	1.084 мм
Высота	112 мм
Объем змеевика коллектора	0.42 л
Материал абсорбера	Сu
Вес (пустой)	≈43 кг
Проходное сечение патрубков	23 мм
Толщина ударопрочного стекла	3.2 мм
Пропускная способность стекла	91%
Абсорбция	95%
Эмиссия	5%

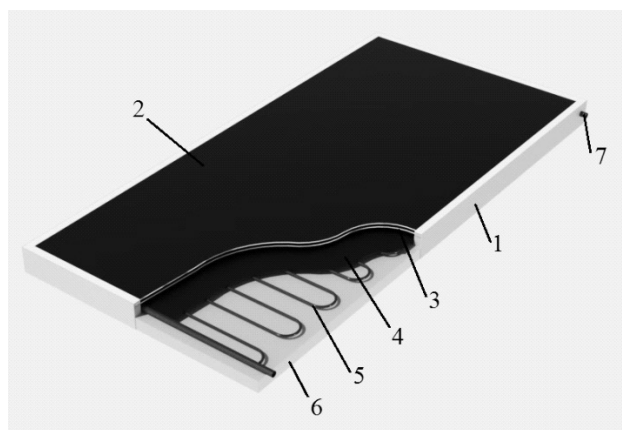


Рис. 1. Общий вид солнечного плоского коллектора

- 5. Теплоотводящая трубка коллектора (медь, Ø9 мм);
- 6. Теплоизоляция (50 мм);
- 7. Магистраль (медь, Ø23 мм).

Заявленная конструкция солнечного коллектора представлена по индивидуальным размерам, содержащая корпус, в котором размещен поглощающий элемент с хорошей теплопроводностью, абсорбер, представляющий собой лист металла. Абсорбер связан с теплопроводящей системой в виде трубчатого змеевика, и плотно прилегает к боковой теплоизоляции (слева, справа) для уменьшения конвективного теплообмена между абсорбером и внутренним стеклом. Также в конструкцию входит прозрачный элемент (два закаленных стекла с высокой пропускной способностью, с расстоянием друг от друга 11.8 мм). Внутри корпуса размещена термостойкая вспененная теплоизоляция с малой теплопроводностью.

Модель солнечного термального коллектора основана на системе балансовых уравнений тепловых потоков в коллекторе, возникающих из-за поступления солнеч-

ного излучения в коллектор, отвода тепла теплоносителем и рассеяния (потерь) тепла в окружающее пространство.

Количество тепла, поступающего от солнечного излучения через двойное остекление коллектора, определяется соотношением

$$Q_{солн} = qSt \tag{1}$$

где: $q, Вт/(м^2 \cdot с)$ — тепловой поток, попадающий на пластину термального солнечного коллектора;

$S = ab, м^2$ — площадь пластины (a, b — длина и ширина пластины соответственно);

$\tau, с$ — время нагрева пластины.

Величина теплового потока с учетом эффектов пропускания, отражения и поглощения теплового излучения при прохождении через двойное остекление определяется соотношением (при отсутствии поглощения излучения остеклением)

Таблица 2. Исходные данные для расчета

Наименование, характеристики	15.07	
	На 12:00	На 15:00
1. Геометрические характеристики солнечного коллектора (рабочая площадь) А). Высота, a , м Б). Ширина, b , м В). Площадь, m^2 $S=a \cdot b$	2,1125 1,020 2,15475	
2. Общее время инсоляции τ , с	10 800	10 800
3. Внутренний диаметр трубопровода d , м	0,009	
4. Массовый расход теплоносителя (вода), G, кг/с $G=V/\tau$	0,006944444 (25/3600)	0,006944444
5. Характеристики теплоизоляционного материала А). Материал Б). Толщина $\delta_{изол}$, м	вспененный каучук, термический 0,05	
6. Характеристики стекла А). Тип Б). Толщина, $\delta_{ст}$, м	Боросиликатное, закаленное, структурированное, 0,0032	
7. Характеристика воздушной прослойки А). 1 толщина $\delta_{возд}$, м Б). 2 толщина $\delta_{возд}$, м	0,0118 0,0207	
8. Характеристики пластины коллектора А). Тип Б). Толщина, м В). Температура плавления, K	Cu 0,026 1356,2	

Таблица 3. Табличные данные для расчета

Наименование, характеристики	15.07	
	На 12:00	На 15:00
1. Характеристики стекла: А). R — коэффициент отражения защитного стекла Б). Средняя величина Источник данных: [5], [6], [7]	0,0987	0,0804
2. Среднемесячная температура воздуха, t , °C Источник данных: [8]	+21,1	
3. Характеристики теплоносителя: А). Тип Б). Удельная теплоемкость c , Дж/(кг·град)	Вода ≈ 4200	
5. Характеристики теплоизоляционного материала А). Теплопроводность λ , Вт/(м·K) Источник данных: [9]	0,033	
6. Характеристики стекла А). Теплопроводность λ , Вт/(м·K) Источник данных: [10]	0,142	
7. Характеристика воздушной прослойки А). Теплопроводность λ , Вт/(м·K) Б). Теплопроводность λ , Вт/(м·K) Источник данных: [11]	0,0268 0,3238	
8. Характеристики пластины коллектора А). Коэффициент поглощения пластины ϵ термального коллектора, A Источник данных: [5]	0,95	
9. Плотность теплового потока солнечного излучения, $q_{солн}$, Вт/(м ² ·с) Источник данных: [12]	878	

Таблица 4. Результаты расчета

Наименование характеристики	Для 15.07	
	На 12:00	На 15:00
1. Количество тепла, поступающего от солнечного излучения $Q_{\text{солн}} = qS\tau$ (Формула 1) Средняя величина	16,3 · 10 ⁶	
2. Величина теплового потока, $Bm/(m^2 \cdot c)$ $q = q_{\text{солн}} \cdot (1-R)^2 \cdot (1+R2) \cdot A$ (Формула 2) Средняя величина	696,3130	709,9281
3. Тепловые потери в солнечном термальном коллекторе вследствие собственного излучения $Q_{\text{изл. коллект}} = S\sigma t_{\text{коллектора}}^4 \tau (1-RA)$ (Формула 3)	1698,170683	
4. Тепловые потери вследствие механизма теплопроводности через остекление (включая имеющиеся воздушные зазоры) $Q_{\text{остекл}} = S \cdot \frac{t_{\text{коллектора}} - t_{\text{окр}}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \tau$, (Формула 4)	2,57 · 10 ⁵	
5. Тепловые потери вследствие механизма теплопроводности через теплоизолирующую подложку с обратной стороны коллектора $Q_{\text{изол}} = S \frac{\lambda_{\text{изол}} \cdot (t_{\text{коллектора}} - t_{\text{окр}})}{\delta_{\text{изол}}} \tau$, (Формула 5)	1,24 · 10 ⁵	
6. Количество тепла, передаваемое теплоносителем за время работы коллектора $Q_{\text{теплоносителя}} = Q_{\text{солн}} - Q_{\text{изл. коллект}} - Q_{\text{остекл}} - Q_{\text{изол}}$ (Формула 6)	1,56 · 10 ⁷	
7. Повышение температуры теплоносителя при работе коллектора, $\Delta t = \frac{Q_{\text{теплоносителя}}}{G_{\text{тс}}}$, (Формула 7)	49,8	
8. Характеристики пластины коллектора. Коэффициент поглощения пластины ϵ термального коллектора, A	0,95	

$$q = q_{\text{солн}} (1-R)^2 (1+R^2) A, \quad (2)$$

где: $q_{\text{солн}}$ $Bm/(m^2 \cdot c)$ — плотность теплового потока солнечного излучения;

R — коэффициент отражения защитного стекла;

A — коэффициент поглощения пластины термального коллектора.

Коэффициенты отражения и поглощения для различных материалов приводятся в справочной литературе [1]. Плотность теплового потока солнечного излучения для заданных географической широты и климатических условий определяется по справочным таблицам [2, 3].

Тепловые потери в солнечном термальном коллекторе вследствие собственного излучения коллектора и механизма теплопроводности через двойное остекление (включая имеющиеся воздушные зазоры) и теплоизолирующую подложку с обратной стороны коллектора определяются следующими соотношениями:

$$Q_{\text{изл. колл}} = S\sigma t_{\text{колл}}^4 \tau (1-RA), \quad (3)$$

где: $\sigma = 5,67 \cdot 108$ — постоянная Стефана–Больцмана;
 $t_{\text{колл}}$ — температура пластины коллектора,

$$Q_{\text{остекл}} = S \cdot \frac{t_{\text{коллектора}} - t_{\text{окр}}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \tau, \quad (4)$$

Таблица 5. Постановка задачи в Flow Simulation

Входные данные		
Общие настройки	Заданные параметры	
Тип задачи	Внешняя: Теплопроводность в твердых телах; Радиационный теплообмен: Солнечное излучение <i>Определено место положение и время г. Хабаровска</i> Нестационарность Гравитация	+21,1 48°29' 6:00:00
Текущая среда	Вода, газы	
Материал	Заданы свойства материалов	Корпус Утеплитель
Изначальные условия	Давление 101325 <i>Па</i> Начальная t_0 °C	
Граничные условия	Массовый расход на входе Давление окружающей среды	25 л/ч 101325 <i>Па</i>
Поверхности радиационного теплообмена	Абсорбер	95%
Цели	Температура окружающей среды, твердого тела	
Сетка	Ручная настройка	2.336.629 ячеек
Опции управления расчетом		
Условия завершения	Сходимость целей Итерации	112
Настройка шага	Шаг по времени Длительность	1800 <i>s</i> 56 <i>ч</i>
Прочее	Положение СК Физическое время расчета	Горизонтальное 5,52 <i>ч</i>

где: $t_{колл}$ и $t_{окр}$, °C — температуры пластины коллектора и окружающей среды соответственно;

δ_i , м — толщины стекол и воздушных прослоек в термальном коллекторе;

λ_i , Вт/(м·К) — теплопроводности стекла и воздуха (считаются постоянными в рабочем диапазоне температур термального коллектора) и

$$Q_{изол} = S \frac{\lambda_{изол} (t_{колл} - t_{окр})}{\delta_{изол}} \tau, \quad (5)$$

где: $\delta_{изол}$, м — толщина теплоизолирующего материала в термальном коллекторе;

$\lambda_{изол}$, Вт/(м·К) — теплопроводность теплоизолирующего материала (считается постоянной в рабочем диапазоне температур термального коллектора).

Таким образом, количество тепла за время работы коллектора, передаваемое теплоносителю определяется соотношением:

Результаты анализа в SolidWorks

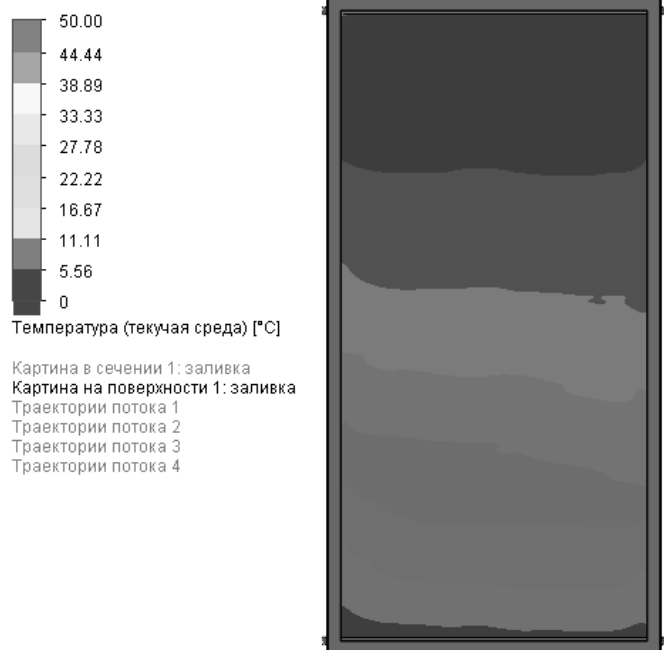


Рис. 2. Температура пластины

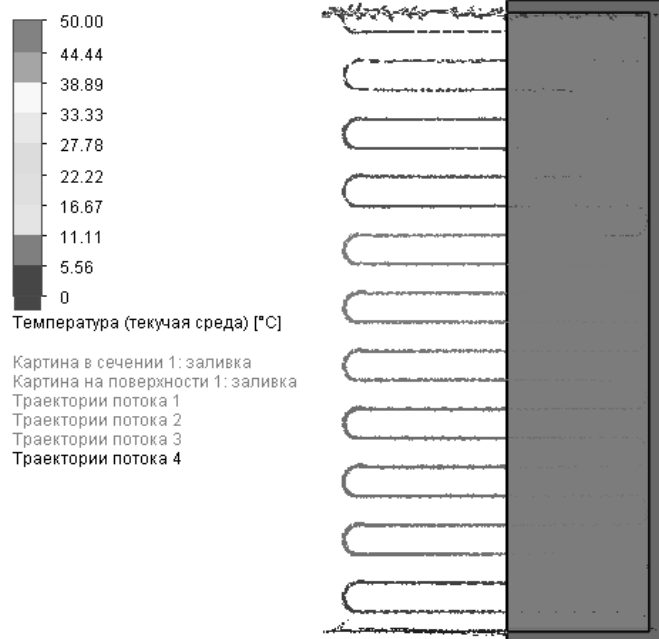


Рис. 3. Движение текучей среды

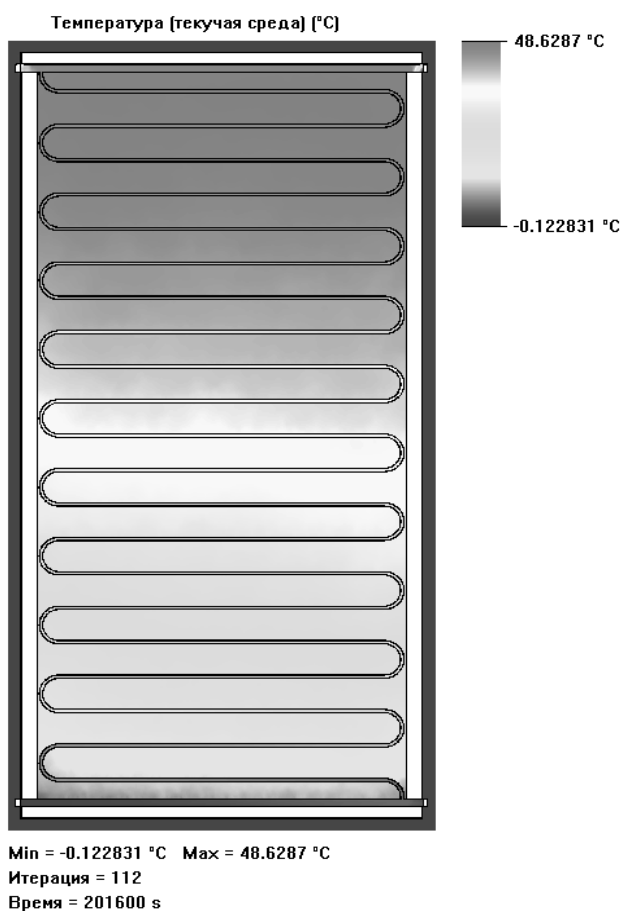


Рис. 4. Температура

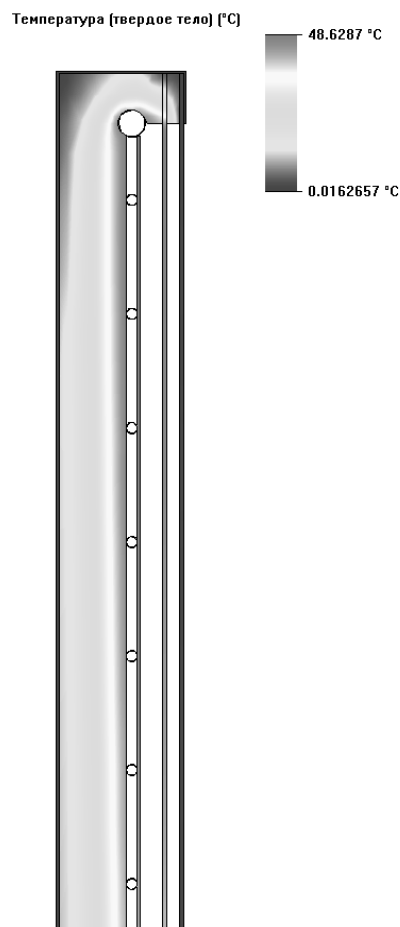


Рис. 5. Температура (текучая среда)
(твердое тело)

Таблица 6. Локальные параметры

Локальный параметр пластины			
Локальный параметр	Минимум	Максимум	Среднее
Температура (твердое тело) [°C]	4,939504443	48,62872591	34,42176794
Локальный параметр воды			
Локальный параметр	Минимум	Максимум	Среднее
Удельная теплоемкость (Cp) [J/(kg*K)]	4179,500003	4219,582819	4183,645835
Температура (текучая среда) [°C]	0,119372754	48,4281393	32,48898814
Локальный параметр внешнего стекла			
Локальный параметр	Минимум	Максимум	Среднее
Коэффициент теплоотдачи [W/m ² /K]	0,008215388	14,58069146	3,75664214
Температура (твердое тело) [°C]	0,061489707	4,832941766	0,491262188
Коэффициент теплопроводности текучей среды [W/(m*K)]	0,024376999	0,563771968	0,29318266
Локальный параметр внутреннего стекла			
Локальный параметр	Минимум	Максимум	Среднее
Коэффициент теплоотдачи [W/m ² /K]	0,000768257	191067,9059	24,58125877
Температура (твердое тело) [°C]	0,064710923	47,79497836	31,34859404
Коэффициент теплопроводности текучей среды [W/(m*K)]	0,024659668	0,640923022	0,323476248

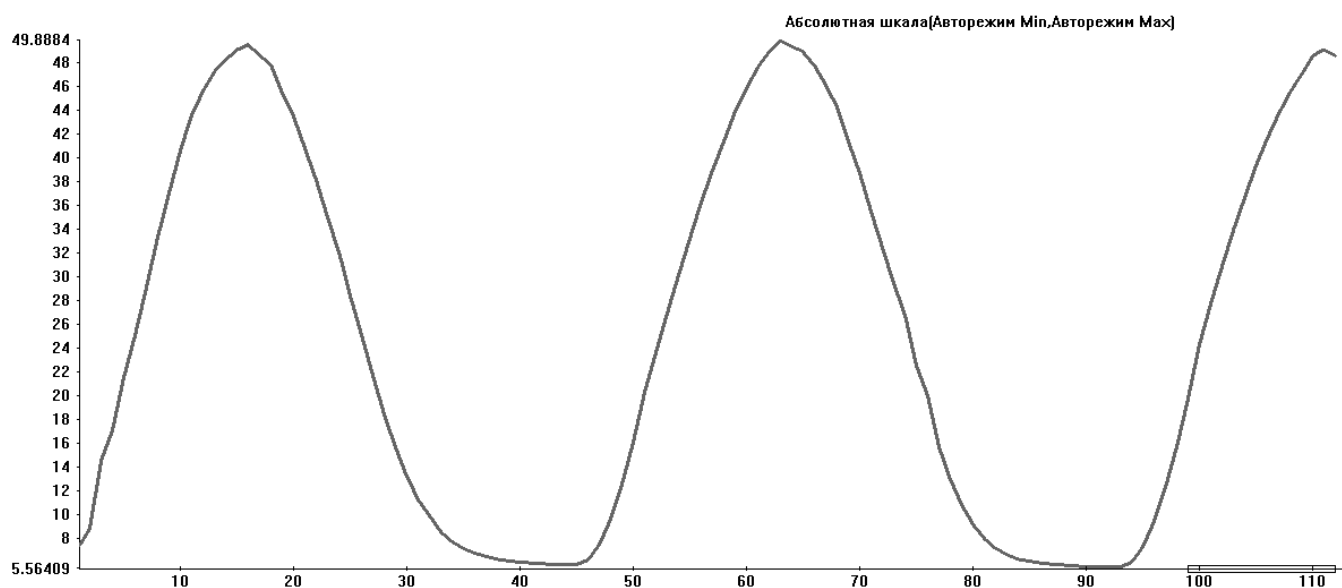


Рис. 6. Динамика температуры теплоносителя

$$Q_{\text{теплон}} = Q_{\text{солн}} - Q_{\text{изл колл}} - Q_{\text{ост}} - Q_{\text{изол}} \quad (6)$$

Повышение температуры теплоносителя при работе солнечного термального коллектора определяется следующим соотношением

$$\Delta t = \frac{Q_{\text{теплон}}}{G \cdot c} \tau, \quad (7)$$

где: G , кг/с — массовый расход теплоносителя;

c , Дж/(кг·град) — удельная теплоемкость теплоносителя.

Следовательно, на стационарном режиме работы температура коллектора будет превышать температуру окружающей среды на величину, определяемую соотношением: [4].

$$dQ_{x1} = dQ_x - dQ_{x+dx} \quad (8)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. СП 23–10–2004. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование тепловой защиты зданий.
2. СНиП 23–01–99. Строительные нормы и правила. Строительная климатология.
3. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. — М.: Машиностроение, 1983. — 559 с.
4. Карташев, А.Л., Сафонов, Е.В., Карташева, М. А. Разработка математической модели установки автономного теплообеспечения на основе солнечного теплового коллектора. // Вестник ЮУрГУ, № 34, 2011– с. 61–68. [Электронный ресурс] режим доступа: <https://elibrary.ru/>
5. Коэффициент отражения (ρ ,%) при различных углах падения для стекла и воды. [Электронный ресурс] режим доступа: <https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/LightAndColor/FactorReflection/>
6. Азимут и высота солнца над горизонтом [Электронный ресурс] режим доступа: <https://planetcalc.ru/320/>
7. Географические координаты Хабаровска [Электронный ресурс] режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/>
8. Средняя месячная и годовая температура воздуха, °С. РФ. Хабаровский край, [Электронный ресурс] режим доступа: <https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/>
9. Таблица теплопроводности материалов [Электронный ресурс] режим доступа: <https://termoizol.com/polnaya-tablitsa-teploprovodnosti-razlichnyh-stroitelnyh-materialov.html>
10. Теплопроводность и плотность стекла, свойства фарфора, фаянса, хрусталя [Электронный ресурс] режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/keramika-i-steklo>
11. Теплопроводность воздуха в зависимости от температуры и давления [Электронный ресурс] режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-gazov/gazovye-smesi/>
12. СНиП 23–01–99. Таблица 4 — Суммарная солнечная радиация (прямая и рассеянная) на горизонтальную поверхность при безоблачном небе. МДж/м². РФ в зависимости от месяца и географической широты. 40–68° с.ш. [Электронный ресурс] режим доступа: <https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/Climate/>

© Милуков Павел Александрович (Pavel-milukov@mail.ru).

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Тихоокеанский государственный университет