УДК 697.7

А.А. Туник
ИРНИТУ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ПЛОСКОМ СОЛНЕЧНОМ КОЛЛЕКТОРЕ SUN 1

Приведена математическая модель процессов тепломассопереноса в плоском жидкостном солнечном коллекторе, на основе которой была разработана новая гелиоустановка под названием SUN 1, имеющая оригинальную форму тепловоспринимающих трубок, позволяющую теплоносителю дольше находиться под воздействием солнечной энергии, а следовательно нагреваться до большей температуры, что, в свою очередь, увеличивает скорость его нагрева.

Ключевые слова: солнечный коллектор, солнечная радиация, теплоноситель, тепловоспринимающие трубки, математическая модель, термодинамические характеристики, КПД коллектора, температура теплоносителя

Системы жизнеобеспечения играют огромную роль в жизни каждого современного человека. Сейчас уже тяжело представить себе жизнь без таких благ цивилизации, как электричество, отопление и горячая вода. Однако далеко не каждый задается вопросом о том, откуда они берутся.

Ежегодное потребление угля в мире составляет примерно 3 млрд т. Одна крупная теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) в среднем сжигает примерно 2 млн т угля в год. Это и позволяет нам получать тепло и свет. Но мало кто задумывается о двух основных моментах.

Во-первых, все выбросы ТЭЦ являются токсическими веществами, негативно воздействующими на организм человека. Во-вторых, запасы ископаемого топлива конечны и постоянно уменьшаются, при этом потребление энергии постоянно растет. Помимо этого во многих населенных пунктах существуют проблемы с теплоснабжением, а в некоторых отдаленных и труднодоступных районах отсутствует устойчивое энергоснабжение.

Кроме ТЭЦ существуют гораздо более экологически чистые источники энергии или альтернативные источники энергии. К ним относятся вода, земля, солнце, ветер, биотопливо и др. На данный момент в мире ведется активное освоение данного вида энергетики.

Альтернативная энергетика, в частности солнечная энергетика, имеет множество достоинств:

- неиссякаемый источник энергии;
- данные технологии легко интегрировать в уже существующие системы энергоснабжения;
- общедоступность возобновляемых ресурсов позволяет уменьшить зависимость стран от импорта традиционного вида топлива;
- мобильность и автономность данных технологий позволяет использовать их даже в самых труднодоступных местностях [1];

возможность применения наукоемких технологий [2—5];
экологически чистое производство энергии [6].

Если воспользоваться атласом ресурсов солнечной энергии на территории России О.С. Попеля, С.Е. Фрида [7], то можно увидеть, что во многих регионах нашей страны уровень солнечной активности позволяет применять гелиоколлекторы. Однако анализ различных моделей плоских солнечных коллекторов показал, что большинство из них малоэффективны в регионах с холодным климатом, при том что солнечная активность в большей части данных регионов имеет высокий уровень. В связи с этим было проведено исследование на возможность внесения ряда существенных нововведений в конструкцию плоских солнечных коллекторов, что позволит увеличить их эффективность и КПД.

Математическая модель плоского жидкостного солнечного коллектора

Уже не раз встречались случаи успешного применения математического моделирования при исследовании процессов тепломассопереноса в различных системах и средах [8—12]. На основе [13—16] была разработана математическая модель плоского жидкостного солнечного коллектора, благодаря которой можно исследовать процессы тепломассопереноса в плоском солнечном коллекторе, а также рассчитать термодинамические параметры и КПД любой модели гелиоустановок указанного типа.

В плоском солнечном коллекторе происходят теплотери через верхнюю U_t и нижнюю U_b части устройства, а также через его боковые стенки U_h , что вместе составляет полный коэффициент теплопроводности, представленный в виде следующего соотношения:

$$U_L = U_t + U_b + U_h. \quad (1)$$

Расчет коэффициента теплопроводности U_h через боковые стенки коллектора это крайне сложная задача. Однако в правильно спроектированном устройстве эти потери будут крайне малы, поэтому ими можно пренебречь.

Коэффициент теплопроводности через нижнюю часть солнечного коллектора рассчитывается по формуле

$$U_b = 1/R_{\text{общ}}, \quad (2)$$

где $R_{\text{общ}}$ — суммарное сопротивление теплопроводности всех слоев, лежащих ниже трубного узла $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$, и согласно [7] находится по формуле

$$R_0 = \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{\delta_n}{\lambda_n}, \quad (3)$$

где δ — толщина слоя; λ — коэффициент теплопроводности слоя.

Из формулы (3) видно, что с увеличением толщины утеплителя увеличивается коэффициент теплопроводности через заднюю стенку коллектора.

Эмпирическое соотношение для коэффициента теплопроводности через верхнюю часть коллектора было получено С.А. Клейном [14] на основе метода Г.Ц. Хоттеля и Б.Б. Верца [15]:

$$U_t = \left[\frac{N}{\left(\frac{344}{T_p} \right) \left(\frac{T_p - T_a}{N + f} \right)^{0,31} + \frac{1}{h_{\omega}}} \right]^{-1} + \frac{\sigma(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{\left[\varepsilon_p + 0,0425N(1 - \varepsilon_p) \right]^{-1} + \left(\frac{(2N + f - 1)}{\varepsilon_g} - N \right)}, \quad (4)$$

где N — число стеклянных покрытий; T_a — температура окружающей среды, К; T_p — температура поглощающей пластины, К; $f = (1 - 0,04h_{\omega} + 5 \cdot 10^{-4}h_{\omega}^2) \times (1 + 0,058N)$; σ — постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²·К⁴; ε_p — степень черноты пластины; ε_g — степень черноты стекла; h_{ω} — коэффициент конвективной теплоотдачи в окружающую среду, Вт/м²·°С, определяется по формуле

$$h_{\omega} = 5,7 + 3,8v, \quad (5)$$

где v — скорость ветра, м/с.

Из формулы (4) видно, что с увеличением числа стеклянных покрытий тепловые потери через верхнюю часть коллектора уменьшаются.

Режим работы солнечного коллектора описывается уравнением энергетического баланса, которое расчленяет энергию солнечной радиации на полезную энергию и потери. Воспользуемся основным уравнением баланса энергии для солнечных коллекторов [13]:

$$A_c \{ [HR(\tau\alpha)]_b + [HR(\tau\alpha)]_d \} = Q_u + Q_L + Q_s, \quad (6)$$

где A_c — площадь коллектора; H — плотность потока солнечного излучения (прямого или рассеянного), падающего на единицу площади поверхности с произвольной ориентацией; R — коэффициент перехода от плотности прямого или рассеянного излучения к плотности потока излучения в плоскости ориентации коллектора; $(\tau\alpha)$ — приведенная поглощательная способность системы покрытий относительно прямого и рассеянного излучения; Q_u — тепловой поток, переданный рабочей жидкости коллектора (полезное тепло), Вт; Q_L — тепловые потери коллектора в окружающую среду путем излучения и конвекции, а также путем теплопроводности по опорам поглощающей пластины и т.д. Потери вследствие отражения от покрытий учитываются членом $(\tau\alpha)$, Вт; Q_s — поток тепла, аккумулируемого коллектором, Вт.

На рис. 1, а [13] изображено ребро длиной $(W - D)/2$. Выделим элемент ребра единичной длины в направлении потока жидкости, ширина которого равна Δx (рис. 1, б [13]).

Рис. 1. Баланс энергии для элемента ребра [13]

Воспользуемся выражением, приведенным в [13] для плоского коллектора и описывающим поглощенную коллектором полезную энергию на единицу длины в направлении потока жидкости:

$$q'_u = [(W - D)F + D][S - U_L(T_f - T_a)]. \quad (7)$$

Из этого выражения в [13] выведено выражение

$$q'_u = WF'[S - U_L(T_f - T_a)]. \quad (8)$$

где F' — эффективность коллектора, равная

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L[D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{f,i}} \right]}, \quad (9)$$

где $(W - D)$ — ширина изолированного ребра солнечного коллектора, т.е. W — расстояние между трубами, м; D — диаметр трубы (рис. 2 [13]), м; F — эффективность прямого ребра коллектора прямоугольного профиля; $h_{f,i}$ — коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к жидкости; D_i — внутренний диаметр трубы, м; C_b — проводимость соединения листа с трубой. Проводимость соединения листа с трубой можно оценить, если известны коэффициент теплопроводности k_b , средняя толщина слоя γ и длина соединения b :

$$C_b = \frac{k_b b}{\gamma}. \quad (10)$$

Рис. 2. Размеры листа и трубы [13]

Проводимость может оказывать существенное влияние на рабочие характеристики коллектора. Экспериментально доказано, что простое крепление труб к листу с помощью проволоки или струбцин приводит к существенному ухудшению характеристик коллектора. Необходим надежный контакт металлов, чтобы сопротивление между листом и трубой не превышало 0,03 (м·°С)/Вт.

Вернемся к уравнению (9). Для большинства геометрических схем коллектора физический смысл параметра F' становится ясным, если принять во внимание, что знаменатель уравнения (9) представляет собой представление сопротивления переносу тепла от жидкости к окружающему воздуху. Это сопротивление обозначим $1/U_o$. С другой стороны, числитель представляет со-

бой сопротивление переносу тепла от поглощающей пластины коллектора к окружающему воздуху.

$$F' = \frac{U_o}{U_L}. \quad (11)$$

Другая трактовка F' следует из уравнения (8). Согласно этому уравнению, F' в некоторой точке представляет собой практически полное отношение фактически поглощенной энергии к полезной энергии, поглощенной в случае, когда температура поглощающей пластины равна локальной температуре жидкости.

Вторая трактовка нуждается в пояснении. Рассмотрим идеализированный случай:

когда интенсивность теплоотдачи от стенки трубы к жидкости бесконечно велика ($h_{foi} \rightarrow \infty$) или сопротивление теплоотдаче от стенки трубы к жидкости равно нулю;

контакт между пластиной и трубой является идеальным, т.е. сопротивление переносу тепла от листа к трубе равно нулю;

пластина изготовлена из материала с бесконечно большой теплопроводностью.

При этих условиях температура пластины, очевидно, не зависит от x и равна локальной температуре жидкости. Кроме того, эффективность ребра $F = 1$. Согласно уравнению (7), полезная энергия в этом случае будет максимальной и равной

$$(q_u)'_{\max} = W [S - U_L (T_f - T_a)]. \quad (12)$$

Подставляя этот результат в уравнение (8), получим

$$F = \frac{q_u'}{q_u'_{\max}} \leq 1. \quad (13)$$

Для любой конструкции коллектора и любого расхода жидкости коэффициент F' является практически постоянной величиной. Единственными переменными в уравнении (9), которые могут зависеть от температуры, являются отношения U_L/C_b , U_L/h_{foi} и эффективность ребра F . Для большинства конструкций коллектора наиболее существенной из этих переменных будет F , но и она не очень сильно зависит от температуры.

Полезная энергия на единицу трубы, определяемая уравнением (8), в конечном счете передается жидкости. Жидкость поступает в коллектор при температуре T_{foi} и выходит при более высокой температуре T_{fo} . С помощью рис. 3 [13] баланс энергии для элемента жидкости на участке одной трубы длиной Δy можно представить в виде

$$\dot{m} C_p T_f|_y - \dot{m} C_p T_f|_{y+\Delta y} + \Delta y q_u' = 0, \quad (14)$$

где $\dot{m}$ — массовый расход теплоносителя, кг/ч; C_p — теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К).

Рис. 3. Баланс энергии для элемента жидкости [13]

Если разделим уравнение на Δy , найдем предел при $\Delta y \rightarrow \infty$ и подставим выражение (8) для q'_u , то получим

$$\dot{m}C_p \frac{dT_f}{dy} - WF' \left[S - U_L (T_f - T_a) \right] = 0. \quad (15)$$

Интегрируя это выражение в предположении, что F' и U_L не зависят от y (при граничном условии $T_f|_{y=0} = T_{f,i}$), получим следующее распределение температуры:

$$\frac{T_f - T_a - S/U_L}{T_{f,i} - T_a - S/U_L} = e^{-[U_L WF' y / \dot{m}C_p]}, \quad (16)$$

где W — расстояние между трубками коллектора, м; F' — эффективность коллектора; S — энергия солнечного излучения, поглощенного единицей поверхности, Дж; U_L — полный коэффициент теплопередачи, Вт/м²·°C; T_a — температура воздуха, К; T_f — температура жидкости, К.

Если длина коллектора в направлении потока равна L , то температуру жидкости на выходе из коллектора $T_{f,o}$ можно определить, заменяя y в выражении (16) величиной L .

Выразим из данного уравнения T_f :

$$T_f - T_f - S/U_L = e^{-[U_L WF'L / \dot{m}C_p]} (T_{f,i} - T_a - S/U_L). \quad (17)$$

Получим необходимую нам формулу для вычисления температуры жидкости на выходе из коллектора T_f :

$$T_f = e^{-[U_L WF'L / \dot{m}C_p]} (T_{f,i} - T_a - S/U_L) + T_a + S/U_L. \quad (18)$$

Для вычисления температуры жидкости на выходе из коллектора необходимо знать величину полного коэффициента теплопередачи коллектора.

Коэффициент теплоотдачи $h_{f,o}$ характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой. Коэффициент α показывает, какое количество тепла передается от единицы поверхности стенки к жидкости в единицу времени при разности температур между стенкой и жидкостью в 1 К.

Установлено, что коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов: вида и режима движения жидкости, ее физических свойств, размеров и формы стенки, шероховатости стенки. Определение $h_{f,o}$ является основной задачей расчета теплообменных аппаратов. Обычно коэффициент теплоотдачи определяют из критериальных уравнений, полученных преобразованием дифферен-

циальных уравнений гидродинамики и конвективного теплообмена методами теории подобия.

Согласно положениям теории подобия конвективный теплообмен без изменения агрегатного состояния вещества в стационарных условиях может быть описан критериальным уравнением вида

$$Nu = f(Re, Pr, Gr, \Gamma, \dots). \quad (19)$$

Критерий Нуссельта, входящий в уравнение (19), является определяемым. При известном значении Nu коэффициент теплоотдачи может быть рассчитан по формуле

$$h_{f,i} = \frac{Nu\lambda}{d}, \quad (20)$$

где d — диаметр трубок, м.

Коэффициент отвода тепла из коллектора F_R представляет отношение фактической полезной энергии коллектора к полезной энергии, когда температура всей поглощающей пластины равна температуре жидкости на входе:

$$F_R = \frac{GC_p (T_{f,o} - T_{f,i})}{[S - U_L (T_{f,i} - T_a)]}, \quad (21)$$

где G — расход жидкости на единицу площади коллектора.

С учетом формулы (16) при $y = L$ коэффициент F_R можно также представить в виде

$$F_R = \frac{GC_p}{U_L} \left(1 - e^{\frac{-U_L F'}{GC_p}} \right). \quad (22)$$

Коэффициент F_R никогда не может быть больше коэффициента F' .

Зная температуру теплоносителя на входе в коллектор $T_{f,i}$, а также коэффициент отвода тепла F_R , можно рассчитать полную полезную энергию плоского солнечного коллектора по следующей формуле:

$$Q_U = AF_R [S - U_L (T_{f,i} - T_a)]. \quad (23)$$

Термодинамические характеристики и коэффициент полезного действия (КПД) солнечного коллектора SUN 1

После анализа вышеописанной модели был разработан солнечный коллектор SUN 1 (SolarUnit 1) (рис. 4).

Рис. 4. Плоский жидкостный солнечный коллектор SUN 1

Дальнейшее описание будет вестись по рис. 5.

Рис. 5. Солнечный коллектор SUN 1 в разрезе: 1 — стеклопакет; 2 — деревянные штапики; 3 — стальной лучепоглощающий лист; 4 — гребенка; 5 — медные трубки; 6 — фольга; 7 — утеплитель; 8 — корпус из фанеры; 9 — выходные патрубки

Корпус 8 солнечного коллектора SUN 1 выполнен из фанеры, покрытой антикоррозионной мастикой.

Поверхность солнечного коллектора представляет собой светопрозрачную изоляцию из стеклопакета 1, который закреплен деревянными штапиками 2. Под стеклом находится воспринимающая поверхность или абсорбер 3. Он представляет собой металлический лист, покрытый черной эмалью. Использование стеклопакета, состоящего из двух стеклянных листов позволило сократить теплопотери через переднюю часть коллектора.

Медные трубки 5 имеют форму змеевика и присоединяются к медно-латунным гребенкам 4 с диаметром условного прохода 20 мм. Также коллектор имеет четыре выходных патрубка 9, что позволяет использовать разные варианты подключения.

Внутренние стенки коллектора SUN 1 обклеены фольгой 6, как и лицевая сторона утеплителя, что позволяет снизить теплопотери через боковые и задние стенки, кроме того, улучшено теплопоглощение трубок.

Утеплителем 7 в данном устройстве является поропласт [17]. Теплопроводность λ данного утеплителя составляет $0,036 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, что гораздо ниже, чем у многих известных утеплителей. Кроме того, слой утеплителя в данном коллекторе больше, чем у аналогов. Это позволит сократить тепловые потери через заднюю стенку SUN 1.

Конструкция солнечного коллектора SUN 1 позволяет производить его вскрытие, ремонт и замену отдельных его деталей.

Благодаря описанной выше математической модели, и в частности формуле (18), удалось установить, что при прочих равных условиях с увеличением длины нагревательных трубок солнечного коллектора увеличивается время нахождения теплоносителя в зоне нагрева, а следовательно, и его конечная температура на выходе из солнечного коллектора увеличится. В свою очередь, это увеличивает скорость нагрева теплоносителя гелиоустановкой.

В связи с этим в конструкции SUN 1 была применена форма трубок в виде змеевика. Такая форма позволяет увеличить длину трубок коллектора при стандартном размере его корпуса.

На рис. 6 наглядно показана зависимость температуры на выходе из солнечного коллектора от длины трубок на примере солнечного коллектора SUN 1.

Рис. 6. График зависимости температуры теплоносителя на выходе из коллектора от энергии, падающей на единицу поверхности и расхода теплоносителя при различных длинах труб

Для испытания солнечного коллектора SUN 1 был построен стенд (рис. 7), на котором помимо него были размещены еще две гелиоустановки, а именно плоский коллектор «Сокол» и вакуумный НУ-СУ.

После ряда экспериментов и сравнительных анализов подтвердился тот факт, что в солнечном коллекторе SUN 1 теплоноситель нагревался на 10...30 мин быстрее, чем в коллекторе «Сокол», имеющем сходную конструкцию, а в некоторых случаях температура теплоносителя на выходе из коллектора SUN 1 была выше, чем у коллектора НУ-СУ с более высоким КПД. При этом площадь коллектора SUN 1 в два раза меньше, чем у двух других моделей.

Рис. 7. Испытательный стенд солнечных коллекторов

В таблице приведены термодинамические характеристики и КПД гелиоустановки SUN 1 в разное время суток и при разных погодных условиях, рассчитанных по математической модели.

Сводная таблица результатов расчета термодинамических параметров и КПД солнечного коллектора SUN 1

Номер позиции	Дата замера	Энергия, падающая на единицу поверхности S , Вт	Коэффициент теплопроводности через нижнюю часть коллектора U_b , Вт/м ² ·°C	Коэффициент теплопроводности через верхнюю часть коллектора U_r , Вт/м ² ·°C	Полный коэффициент теплопроводности U_{L2} , Вт/м ² ·°C	Эффективность прямого ребра прямоугольного профиля F	Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы жидкости $h_{f,i}$	Коэффициент эффективности коллектора F	Коэффициент отвода тепла F_R	Оптический КПД	Полная полезная энергия Q_u , Вт	Часовой КПД	Погодные условия
1	19.06.2012	91,80	0,27	2,52	2,79	0,797	586,95	0,78	0,78	0,72	55,14	0,60	11:00 , облачно, небольшой дождь
2	20.06.2012	158,33		2,56	2,83	0,795	609,23	0,78	0,78		101,76	0,64	10:20, облачно, без осадков
3	21.06.2012	349,49		3,36	3,63	0,754	729,04	0,74	0,74		220,51	0,63	16:00, переменная облачность
4	22.06.2012	387,65		3,40	3,67	0,752	656,44	0,74	0,73		260,23	0,67	14:15, ясно
5	30.06.2012	519,84		3,56	3,83	0,745	636,08	0,73	0,72		351,42	0,68	11:35, ясно
6	03.07.2012	692,78		3,93	4,20	0,728	838,16	0,72	0,71		480,02	0,69	13:20, ясно
7	09.07.2012	362,30		3,38	3,65	0,753	776,94	0,74	0,74		248,42	0,69	13:15, переменная облачность
8	12.07.2012	108,29		3,69	3,96	0,739	873,87	0,73	0,73		39,02	0,36	14:50, переменная облачность
9	13.07.2012	604,15		4,01	4,28	0,725	726,77	0,71	0,70		387,90	0,64	14:50, переменная облачность
10	31.07.2012	304,85		3,53	3,80	0,747	749,13	0,74	0,73		202,36	0,66	11:30, переменная облачность
11	11.08.2012	714,67		3,54	3,81	0,746	914,30	0,74	0,73		486,77	0,68	13:35, ясно
12	06.10.2012	586,94		4,03	4,30	0,724	1047,50	0,72	0,71		404,35	0,69	14:55, ясно

Продолжение табл.

Номер позиции	Дата замера	Энергия, падающая на единицу поверхности S , Вт	Коэффициент теплопроводности через нижнюю часть коллектора U_b , Вт/м ² ·°C	Коэффициент теплопроводности через верхнюю часть коллектора U_v , Вт/м ² ·°C	Полный коэффициент теплопроводности U_L , Вт/м ² ·°C	Эффективность прямого ребра прямоугольного профиля F	Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы жидкости $h_{f,i}$	Коэффициент эффективности коллектора F	Коэффициент отвода тепла F_R	Оптический КПД	Полная полезная энергия Q_{ut} , Вт	Часовой КПД	Погодные условия
13	27.10.2012	149,47	0,27	2,39	2,66	0,805	509,95	0,79	0,79	0,72	98,74	0,66	14:20, переменная облачность
14	28.12.2012	473,47		2,21	2,48	0,815	506,40	0,80	0,80		346,44	0,73	14:40, дымка
15	12.01.2013	516,02		2,67	2,94	0,789	545,57	0,77	0,77		361,96	0,70	14:00, ясно
16	31.01.2013	669,24		2,34	2,61	0,808	560,62	0,79	0,79		502,51	0,75	15:30, ясно
17	09.02.2013	672,55		2,20	2,47	0,815	520,81	0,80	0,80		514,33	0,76	13:05, ясно
18	21.02.2013	699,84		2,36	2,63	0,807	518,79	0,79	0,79		516,23	0,74	14:25, ясно
19	24.03.2013	709,20		3,17	3,44	0,763	525,09	0,75	0,74		489,08	0,69	15:00, ясно
20	30.03.2013	250,70		2,68	2,95	0,789	497,42	0,77	0,77		166,46	0,66	13:45, дымка
21	05.04.2013	636,26		2,77	3,04	0,784	480,22	0,77	0,76		449,57	0,71	11:00, ясно
22	10.04.2013	501,77		3,03	3,30	0,770	674,76	0,76	0,76		357,72	0,71	14:55, переменная облачность
23	27.04.2013	424,87		2,89	3,16	0,778	703,50	0,77	0,76		299,05	0,70	11:35, переменная облачность
24	25.05.2013	511,99		3,53	3,80	0,746	867,64	0,74	0,73		347,37	0,68	15:26, ясно
25	28.05.2013	423,94		3,14	3,41	0,765	653,57	0,75	0,75		305,10	0,72	14:15, дымка

Окончание табл.

Номер позиции	Дата замера	Энергия, падающая на единицу поверхности S , Вт	Коэффициент теплопроводности через нижнюю часть коллектора U_b , Вт/м ² ·°С	Коэффициент теплопроводности через верхнюю часть коллектора U_p , Вт/м ² ·°С	Полный коэффициент теплопроводности U_L , Вт/м ² ·°С	Эффективность прямого ребра прямоугольного профиля F	Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы жидкости $h_{f,i}$	Коэффициент эффективности коллектора F	Коэффициент отвода тепла F_R	Оптический КПД	Полная полезная энергия Q_u , Вт	Часовой КПД	Погодные условия
26	22.06.2013	231,19	0,27	3,59	3,86	0,744	900,19	0,74	0,73	0,72	144,95	0,63	15:20, переменная облачность
27	05.07.2013	571,03		2,91	3,18	0,777	671,75	0,76	0,76		414,71	0,73	12:25, переменная облачность
28	16.07.2013	89,06		2,87	3,14	0,779	599,12	0,76	0,76		37,69	0,42	11:15, дождь
29	23.07.2013	527,04		4,08	4,35	0,722	798,11	0,71	0,70		335,37	0,64	15:00, ясно
30	13.05.2015	576,00		3,86	4,13	0,731	919,97	0,72	0,72		367,24	0,64	14:40, ясно
31	10.06.2015	577,73		3,69	3,96	0,739	846,05	0,73	0,73		374,42	0,65	15:30, ясно
32	13.06.2015	463,46		3,74	4,01	0,737	772,95	0,73	0,72		292,20	0,63	15:20, облачно
33	16.06.2015	621,36		4,00	4,27	0,725	878,62	0,72	0,71		415,72	0,67	11:00, ясно
34	20.06.2015	665,14		3,79	4,06	0,734	835,97	0,73	0,72		439,98	0,61	14:00, ясно
35	27.06.2015	665,86		3,47	3,74	0,749	883,19	0,74	0,74		422,65	0,63	16:10, переменная облачность
36	30.06.2015	666,58		4,17	4,44	0,718	867,62	0,71	0,71		388,73	0,58	14:01, ясно
37	01.07.2015	667,30		3,53	3,80	0,746	698,63	0,73	0,73		417,94	0,63	15:05, облачно
38	08.08.2015	611,86		4,24	4,51	0,715	725,50	0,70	0,70		375,61	0,61	14:40, ясно
39	12.08.2015	91,30		2,71	2,98	0,787	490,21	0,77	0,76		46,75	0,51	16:30, пасмурно
Средние значения		487,06	0,27	3,30	3,57	0,759	707,61	0,75	0,74	0,72	319,65	0,65	

Выводы. Описанная в данной статье математическая модель позволила установить, какие технические решения можно использовать в конструкции плоских солнечных коллекторов для того, чтобы увеличить их эффективность в регионах с холодным климатом. В частности она показала, что, увеличив длину тепловоспринимающих трубок солнечного коллектора, можно увеличить время нахождения теплоносителя в зоне нагрева и при этом увеличить его температуру на выходе из гелиоустановки, что, в свою очередь, увеличит скорость нагрева теплоносителя. Также она математически подтвердила уже известные факты, что можно сократить теплопотери через переднюю и заднюю стенки коллектора, увеличив число стеклянных покрытий и толщину утеплителя соответственно. Это доказывает достоверность представленной в данной статье математической модели.

В результате была разработана новая модель плоского жидкостного солнечного коллектора SUN 1 с оригинальной формой трубок, позволяющей увеличить длину трубок устройства при стандартном размере его корпуса. Экспериментально подтверждено, что форма тепловоспринимающих трубок SUN 1 в виде змеевика ускорила нагревание теплоносителя на 10...30 мин по сравнению с солнечным коллектором «Сокол». Новая модель гелиоустановки обладает уникальными термодинамическими и гидродинамическими характеристиками, рассчитанными благодаря вышеупомянутой математической модели и представленными в таблице. На солнечный коллектор SUN 1 был получен патент на полезную модель [18].

В заключение следует подытожить, что благодаря техническим нововведениям солнечный коллектор SUN 1 хорошо показал себя в испытаниях и способен работать в регионах с холодным климатом. В совокупности с продуманной системой автоматизации [19—21] солнечный коллектор SUN 1 можно использовать для отопления и горячего водоснабжения любого типа объектов.

Библиографический список

1. Соловьёва Е.Г., Кондратенков А.Н. Система автономного энергоснабжения здания в условиях II климатической зоны // Вестник МГСУ. 2013. № 10. С. 208—215.
2. Алферов Ж.И., Андреев В.М., Зимигорова Н.С., Третьяков Д.Н. Фотоэлектрические свойства гетеропереходов AlGaAs-GaAs // ФТП. 1969. Т. 3. № 11. С. 1633—1637.
3. Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Мордынский А.В., Сулейманов М.Ж., Арсатов А.В., Ощепков М.Ю. Эффективность солнечных водонагревателей в климатических условиях России // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2012. № 6. С. 21—26.
4. Такаев Б.В., Казанджан Б.И., Солодов А.П. Воздушный солнечный коллектор с прозрачной тепловой изоляцией капиллярного типа // 1-я Всероссийская школа-семинар молодых ученых и специалистов : сб. науч. тр. М. : МЭИ, 2002. С. 256—261.
5. Байжабагинов А.М., Булатбаев Ф.Н., Булатбаева Ю.Ф. Сравнительный анализ эффективности работы солнечных элементов для выбора объекта исследования и внедрения // Strategiczne putania swiatowej nauki — 2014 : материалы X Междунар. науч.-практ. конф. 2014. Vol. 35. Przemyśl: Nauka i studia. С. 25—29.
6. Рахнов О.Е., Саклаков И.Ю., Потапов А.Д. Особенности построения схем теплоснабжения от автономных источников для крупных производственных комплексов и логистических центров в урбосистемах на экологических принципах // Вестник МГСУ. 2013. № 11. С. 177—187.

7. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселев С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М. : Объединенный институт высоких температур РАН, 2010. 54 с.

8. Гагарин В.Г., Гувэрнюк С.В. Математическая модель эмиссии волокон при обдуве воздушным потоком минераловатных изделий и ее использование при прогнозировании долговечности утеплителя вентилируемого фасада // Вестник Отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук. 2009. № 13. С. 135.

9. Трошкина Г.Н., Чертищев В.В. Расчет параметров системы солнечного теплообеспечения // Материалы докладов Российского национального симпозиума по энергетике. Екатеринбург, 2001. С. 297—299.

10. Хаванов П.А., Маркевич Ю.Г., Чуленёв А.С. Физико-математическая модель теплообмена в конденсационных поверхностях теплогенераторов // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. Серия: Политематическая. 2014. № 4 (35). Ст. 22. Режим доступа: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/22KhavanovMarkevichChulenev-2014_4_35_.pdf.

11. Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. Математическое моделирование теплопереноса в условиях смешанной конвекции в прямоугольной области с источником тепла и теплопроводными стенками // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15. № 1. С. 107—120.

12. Табунициков Ю.А., Бродач М.М. Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М. : АВОК-ПРЕСС, 2002. 194 с.

13. Кляйн С.А., Даффи Дж., Бекман У.А. Анализ переходных режимов в солнечных коллекторах типа «горячий ящик» // Труды Американского общества инженеров-механиков. Серия А: Энергетические машины и установки. 1974. № 2. 30 с.

14. Klein S.A. The effects of thermal capacitance upon the performance // Transactions of the conference on the use of solar energy. University of Arizona Press, Vol. 2. Part 1. 74. 1958.

15. Hottel H.C., Woertz B.B. Performance of flat-plate collectors // Trans. ASME. 64. 91. 1942.

16. Петтих Г. Коллекторы и гелиотермические системы / пер. Н. Корженец. Минск : Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, 2007. 43 с.

17. Бурдонов А.Е., Барахтенко В.В., Зелинская Е.В., Толмачева Н.А. Теплоизоляционный материал на основе термореактивных смол и отходов теплоэнергетики // Строительные материалы. 2015. № 1. С. 48—52.

18. Пат. 112364 RU, МПК F24J2/24. Солнечный коллектор / М.Ю. Толстой, Н.В. Акина, А.А. Туник ; патентообл. ГОУ ИрГТУ. № 2011130485/06 ; заявл. 21.07.2011 ; опубл. 10.01.2012. Бюл. № 1.

19. Садилов П.В., Петренко В.Н. Внедрение автоматизированной гелиоустановки горячего водоснабжения в г. Сочи // Великие реки — 2004 : материалы Междунар. науч.-пром. форума (18—21 мая 2004 г.). Нижний Новгород, 2004. С. 40.

20. Пат. 2313046 RU, МПК F24J2/38. Автономная система слежения за перемещением солнца по небосводу / В.Я. Ерофеев, М.В. Кабанов, А.И. Тарасова, Д.Ф. Гупало; патентообл. Институт мониторинга климатических и экологических систем. № 2006103187/06 ; заявл. 03.02.2006 ; опубл. 20.12.2007.

21. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аржанов В.В., Осипов А.В., Теущаков О.А., Аржанов К.В. Автоматизированная фотоэлектрическая установка с повышенной энергетической эффективностью // Доклады томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2011. № 2-1 (24). С. 282—287.

Поступила в редакцию в ноябре 2015 г.

Об авторах: **Туник Александр Александрович** — соискатель кафедры инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения, инженер-теплоэнергетик отдела энергоучета, **Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)**, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, д. 83, alextun@mail.ru, info@istu.edu.

Для цитирования: *Туник А.А.* Математическая модель процессов тепломассопереноса в плоском солнечном коллекторе SUN 1 // Вестник МГСУ. 2016. № 1. С. 126—142.

A.A. Tunik

MATHEMATICAL MODEL OF HEAT-MASS EXCHANGE PROCESSES IN A FLAT SOLAR COLLECTOR SUN 1

The active development of environmental friendly energy sources alternative to HPPs is currently of great importance in the world. Such alternative energy sources are: water, ground, sun, wind, biofuel, etc. If we have a look at the atlas of solar energy resources on the territory of Russia, we can make a conclusion, that in many regions of our country solar activity level allows using solar collector. Though the analysis of different models of solar collector showed, that most of them are ineffective in the regions with cold climate, though the solar activity of these regions is of a great level.

In this regard, a mathematical model of heat-mass exchange processes in flat solar collectors is introduced in this article. The model was a basis for the development of a new solar collector, named SUN 1, which has an original heating tubes form. This form allows heat transfer medium to be under the influence of solar energy for a longer time and consequently to warm to a higher temperature, increasing the warming rapidity.

Key words: solar collector, solar radiation, heat transfer medium, heating tubes, mathematical model, thermodynamic characteristics, collector efficiency coefficient, heat transfer medium temperature

References

1. Solovyova E.G., Kondratenkov A.N. Sistema avtonomnogo energosnabzheniya zdaniya v usloviyakh II klimaticheskoy zony [Independent Power Supply System of a Building in the Second Climate Zone]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, no. 10, pp. 208—215. (In Russian)
2. Alferov Zh.I., Andreev V.M., Zimigrova N.S., Tret'yakov D.N. Fotoelektricheskie svoystva geteroperekhodov AlGaAs-GaAs [Photovoltaic Properties of the Heteroface Junction AlGaAs-GaAs]. *FTP*. 1969, vol. 3, no. 11, pp. 1633—1637. (In Russian)
3. Frid S.E., Kolomiets Yu.G., Mordynskiy A.V., Suleymanov M.Zh., Arsatov A.V., Oshchepkov M.Yu. Effektivnost' solnechnykh vodonagrevateley v klimaticheskikh usloviyakh Rossii [Effectiveness of Solar Water Heaters in the Climatic Conditions of Russia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [News of the Institutions of Higher Education. North Caucasian Region. Series: Technical Sciences]. 2012, no. 6, pp. 21—26. (In Russian)
4. Takaev B.V., Kazandzhan B.I., Solodov A.P. Vozdushnyy solnechnyy kolektor s prozrachnoy teplovooy izolyatsiey kapillyarnogo tipa [Air-type Solar Collector with Transparent Heat Insulation of Capillary Type]. *1-ya Vserossiyskaya shkola-seminar molodykh uchenykh i spetsialistov: sbornik nauchnykh trudov* [1st All-Russian School-Seminar of Young Scientists and Specialists: Collection of Scientific Articles]. Moscow, MEI Publ., 2002, pp. 256—261. (In Russian)
5. Bayzhabaginov A.M., Bulatbaev F.N., Bulatbaeva Yu.F. Sravnitel'nyy analiz effektivnosti raboty solnechnykh elementov dlya vybora ob'ekta issledovaniya i vnedreniya [Comparative Analysis of Solar Elements Effectiveness for Choosing the Subject of Research and Implementation]. *Strategiczne putania swiatowej nauki — 2014: materialy X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the 10th International Science and Practice Conference "Strategiczne putania swiatowej nauki — 2014"]. 2014, vol. 35, Przemyśl: Nauka i studia Publ., pp. 25—29. (In Russian)

6. Rakhnov O.E., Saklakov I.Yu., Potapov A.D. Osobennosti postroeniya skhem teplosnabzheniya ot avtonomnykh istochnikov dlya krupnykh proizvodstvennykh kompleksov i logisticheskikh tsentrov v urbosistemakh na ekologicheskikh printsipakh [Features of Construction Schemes of Self-heating Sources for Large Industrial Complex and Logistics Centers in Urbosystems on Ecological Principles]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, no. 11, pp. 177—187. (In Russian)

7. Popel' O.S., Frid S.E., Kolomiets Yu.G., Kiselev S.V., Terekhova E.N. *Atlas resursov solnechnoy energii na territorii Rossii* [Atlas of Solar Energy Sources on Russian Territory]. Moscow, Ob"edinennyy institut vysokikh temperatur RAN Publ., 2010, 54 p. (In Russian)

8. Gagarin V.G., Guvernyuk S.V. Matematicheskaya model' emissii volokon pri obduve vozdushnym potokom mineralovatnykh izdeliy i ee ispol'zovanie pri prognozirovanii dolgovечноsti uteplitelya ventiliruemogo fasada [Mathematical Model of Filament Emission during the Blow-off of Mineral-Cotton Products with Air Flow and its Use while Forecasting the Durability of Ventilated Facade Insulation]. *Vestnik Otdeleniya stroitel'nykh nauk Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk* [Proceedings of Construction Sciences Department of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences]. 2009, no. 13, p. 135. (In Russian)

9. Troshkina G.N., Chertishchev V.V. Raschet parametrov sistemy solnechnogo teplosnabzheniya [Calculating the Parameters of Solar Heat Supply System]. *Materialy dokladov Rossiyskogo natsional'nogo simpoziuma po energetike* [Materials of the Reports of Russian National Symposium on Energy Industry]. Ekaterinburg, 2001, pp. 297—299. (In Russian)

10. Khavanov P.A., Markevich Yu.G., Chulenev A.S. Fiziko-matematicheskaya model' teploobmena v kondensatsionnykh poverkhnostyakh teplogeneratorov [Physical and Mathematical Model of Heat Transfer in Condensation Surfaces of Heat Generators]. *Internet-Vestnik VolgGASU. Seriya: Politematicheskaya* [Internet Proceedings of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Polythematic Series]. 2014, no. 4 (35), article 22. Available at: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/22KhavanovMarkevichChulenev-2014_4_35_.pdf. (In Russian)

11. Kuznetsov G.V., Sheremet M.A. Matematicheskoe modelirovanie teplomassopереноса v usloviyakh smeshannoy konveksii v pryamougol'noy oblasti s istochnikom tepla i teploprovodnymi stenkami [Mathematical Modeling of Heat-Mass Exchange in the Conditions of Mixed Convection in a Rectangular Region with Heating Source and Heat Conductive Walls]. *Teplofizika i aeromekhanika* [Thermal Physics and Air Mechanics]. 2008, vol. 15, no. 1, pp. 107—120. (In Russian)

12. Tabunshchikov Yu.A., Brodach M.M. *Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teplovoy effektivnosti zdaniy* [Mathematical Modelling and Optimization of Thermal Effectiveness of Buildings]. Moscow, AVOK-PRESS Publ., 2002, 194 p. (In Russian)

13. Klyayn S.A., Daffi Dzh., Bekman U.A. Analiz perekhodnykh rezhimov v solnechnykh kolektorakh tipa «goryachiy yashchik» [Analysis of the Transient Modes in Solar Collectors of the Type "Hot Box"]. *Trudy Amerikanskoy obshchestva inzhenerov-mekhanikov. Seriya A: Energeticheskie mashiny i ustanovki* [Works of the American Society of Mechanic Engineers. Series A: Energy-Converting Machinery and Systems]. 1974, no. 2, 30 p. (In Russian)

14. Klein S.A. The Effects of Thermal Capacitance upon the Performance. *Transactions of the Conference on the Use of Solar Energy*. University of Arizona Press, vol. 2, part 1, 74. 1958.

15. Hottel H.C., Woertz B.B. Performance of Flat-Plate Collectors. *Trans. ASME*. 64, 91, 1942.

16. Rettikh G. *Kollektory i geliotermicheskie sistemy* [Collectors and Solar Energy Systems]. Russian Translation. Minsk, Mezhdunarodnyy gosudarstvennyy ekologicheskiy universitet im. A.D. Sakharova Publ., 2007, 43 p. (In Russian)

17. Burdonov A.E., Barakhtenko V.V., Zelinskaya E.V., Tolmacheva N.A. Teploizolyatsionnyy material na osnove termoreaktivnykh smol i otkhodov teploenergetiki [Thermal Insulation Materials Based on Thermosetting Resins and Thermal Energy Waste]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2015, no. 1, pp. 48—52. (In Russian)

18. Tolstoy M.Yu., Akinina N.V., Tunik A.A. *Patent 112364 RU, MPK F24J2/24. Solnechnyy kolektor* [Russian Patent 112364 RU, MPK F24J2/24. Solar Collector]. No. 2011130485/06 ; appl. 21.07.2011 ; publ. 10.01.2012, bulletin no. 1. Patent Holder GOU IrGTU. (In Russian)

19. Sadilov P.V., Petrenko V.N. Vnedrenie avtomatizirovannoy gelioustanovki goryachego vodosnabzheniya v g. Sochi [Implementation of the Automated Solar Units of Hot Water Supply in Sochi]. *Velikie reki — 2004 : materialy Mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma (18—21 maya 2004 g.)* [Great Rivers — 2004 : Materials of the International Scientific Industrial Forum (May 18—21, 2004)]. Nizhniy Novgorod, 2004, p. 40. (In Russian)

20. Erofeev V.Ya., Kabanov M.V., Tarasova A.I., Gupalo D.F. *Patent 2313046 RU, MPK F24J2/38. Avtonomnaya sistema slezheniya za peremeshcheniem solntsa po nebosvodu* [Russian Patent 2313046 RU, MPK F24J2/38. Automated Tracking System of Solar Motion in the Sky]. No. 2006103187/06 ; appl. 03.02.2006 ; publ. 20.12.2007. Patent holder: Institut monitoringa klimaticheskikh i ekologicheskikh sistem. (In Russian)

21. Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A., Arzhanov V.V., Osipov A.V., Teushchakov O.A., Arzhanov K.V. *Avtomatizirovannaya fotoelektricheskaya ustanovka s povyshennoy energeticheskoy effektivnost'yu* [Automated Photoelectric Unit with Increased Energy Efficiency]. *Doklady tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki* [Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics]. 2011, no. 2-1 (24), pp. 282—287. (In Russian)

About the author: **Tunik Aleksandr Aleksandrovich** — degree-seeking student, Department of Engineering Communications and Life Support Systems, Heat-and-power engineer, Department of Energy Account, **National Research Irkutsk State Technical University (NR ISTU)**, 83 Lermontova str., Irkutsk, 664074, Russian Federation; alextun@mail.ru, info@istu.edu.

For citation: Tunik A.A. Matematicheskaya model' protsessov teplomassoperenosa v ploskom solnechnom kollektore SUN 1 [Mathematical Model of Heat-Mass Exchange Processes in a Flat Solar Collector SUN 1]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2016, no. 1, pp. 126—142. (In Russian)