

них лініях на оточуюче середовище та обслуговуючий персонал ФЕС.

1. *Бекиров Э.А., Колобов С.И.* Анализ параметров установившихся режимов электрических систем генерации электрической энергии фотоэлектростанциями // Техн.электродинамика. Тем.вип. "Силовая электроника и энергоэффективность". – 2011. – С. 11–15.

2. *Манойлов В.Е.* Основы электробезопасности. – Л.: Энергия, 1976. – 344 с.

3. *Шидловский А.К., Новський В.О., Жаркин А.Ф.* Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями / Київ, Інститут електродинаміки НАН України. – 2013. – 378 с.

4. *Нейман Л.Р., Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники. – М.-Л.: Энергия, 1966. – 402 с.

УДК 662.997

Л.И.Кныш, канд.техн.наук (Днепропетровский национальный университет им. О.Гончара, Днепропетровск)

Влияние тепловой инерционности элементов плоского солнечного коллектора на его энергетические показатели

Проведено исследование влияния тепловой инерционности элементов солнечного коллектора на его энергетические показатели. Математическая модель, построенная на основе уравнения энергии, решалась численно с использованием среднестатистических данных по интенсивности солнечной радиации. Показано существенное влияние тепловой инерционности при локальном рассмотрении работы коллектора. Доказано минимальное влияние теплоёмкости системы на её интегральные энергетические показатели.

Ключевые слова: солнечный коллектор, тепловая инерционность, уравнения теплового баланса, численное решение.

Проведено дослідження впливу теплової інерційності елементів сонячного колектора на його енергетичні показники. Математичну модель, що побудована на основі рівняння енергії, було розв'язано чисельно з використанням середньостатистичних даних щодо інтенсивності сонячної радіації. Показано суттєвий вплив теплової інерційності при локальному розгляді роботи колектора. Доказаний мінімальний вплив теплоємності системи на її інтегральні енергетичні показники.

Ключові слова: сонячний колектор, теплова інерційність, рівняння теплового балансу, чисельне рішення.

Вступление. Солнечный коллектор является основным элементом системы для получения низкопотенциального тепла на основе энергии Солнца. Такое устройство можно считать одним из наиболее популярных среди оборудования альтернативной энергетики. От совершенства конструкции солнечного коллектора в значительной степени зависит эффективность работы всей системы отопления или горячего водоснабжения. Эта конструкция должна обеспечивать максимальное поглощение солнечного излучения и при этом отвечать минимальным тепловым потерям. В то же время надёжное и бесперебойное функционирование гелиосистемы невозможно без правильного подбора и расчёта других её составляющих, таких как теплоаккумулирующий и

расширительный баки, теплоизоляция и трубопроводы, блок автоматики и прочие комплектующие. Работа теплообменных приборов и приборов контроля тесно взаимосвязана и обусловлена. Поэтому согласование их работы с учётом особенности конструкции элементов, климатических условий и времени года является важнейшей технической задачей при монтаже и наладке гелиосистем.

Одним из этапов решения такой задачи можно считать определение временного диапазона, в течение которого необходимо начинать подачу теплоносителя в систему. Очевидно, что существует некоторое "запаздывание" по времени в работе систем на основе гелиоколлекторов (ГК), которое делает реальную температуру теплоно-

сителя несколько ниже той, которая соответствует интенсивности солнечной радиации. Такое отклонение связано с наличием тепловой инерционности основных элементов системы. Это свойственно в большей мере элементам плоского солнечного коллектора, хотя наличие некоторой тепловой инерционности наблюдается и в вакуумированных гелиоколлекторах.

Предлагаемый метод определения времени разогрева проиллюстрирован на простейшем плоском коллекторе, который является наиболее распространённым на сегодняшний день типом солнечного коллектора, оправдывающим себя по эффективности, срокам эксплуатации, надёжности и стоимости. В то же время метод без труда можно распространить и на более сложные конструкции.

Постановка задачи. Плоский солнечный коллектор состоит из тепловоспринимающего элемента (абсорбера), прозрачного покрытия, канала с теплоносителем и теплоизоляционного слоя. Теоретические и экспериментальные исследования тепловой инерционности такой системы проводились в работах [1, 2] и др. В них тепловая инерционность определялась без учёта динамики течения теплоносителя в канале; кроме того, в приведенных работах не проводился учёт распределения интенсивности солнечной радиации в течение суток. Решение задачи при таких существенных упрощениях иллюстрирует лишь качественную картину явления, не позволяющую определить количественные показатели времени "запаздывания" при работе гелиоколлектора.

Задача данного исследования – определить особенности разогрева солнечного коллектора с учётом динамики течения теплоносителя в канале при произвольном задании функциональной зависимости, показывающей изменение интенсивности солнечной радиации в течение суток.

Оценка влияния тепловой инерционности ГК на распределение температуры вдоль течения теплоносителя проводилась на основе решения балансового уравнения закона сохранения энергии, в предположении, что в каждом сечении ГК температура теплопоглощающего элемента, теплоносителя и изоляции равны. Выбор такого приближения связан с тем, что учёт влияния

внешних воздействий, таких как изменение скорости ветра, температуры окружающей среды и пр., можно проводить только приближённо. Поэтому излишняя детализация при расчётах будет приводить лишь к росту погрешности вычислений.

Задача решалась в нестационарной постановке, так как такой режим характерен для работы данного теплообменного аппарата. Так, за время $d\tau$ на поверхность ГК поступает энергия, которая расходуется как на нагрев теплоносителя в канале, так и на нагрев его основных конструктивных элементов:

$$\gamma E(\tau) F d\tau = KF \vartheta(y, \tau) d\tau + \sum mc \cdot d\vartheta(y, \tau) - \frac{1}{B} \left(\frac{d}{dy} \int_0^F \rho w_y i dF \right) F d\tau,$$

где γ – коэффициент восприятия радиации гелиоколлектором; $E(\tau)$ – плотность потока солнечного излучения, поступающего на поверхность ГК в течение суток, Вт/м²; F – площадь поверхности ГК, м²; K – суммарный коэффициент тепловых потерь гелиоколлектора, который учитывает конвективные и лучистые потери через прозрачное покрытие и изоляцию, конвективные потери, связанные с течением теплоносителя в канале, а также кондуктивные потери через изоляцию и прозрачное покрытие, Вт/(м²·К); $\vartheta(y, \tau) = T(y, \tau) - T_{OKP}$ – избыточная температура теплоносителя, К;

$\sum mc = m_{ТЭ}c_{ТЭ} + m_{ТН}c_{ТН} + \frac{1}{2}(m_{СТ}c_{СТ} + m_{ИЗ}c_{ИЗ})$ – суммарная теплоёмкость ГК, состоящая из теплоёмкости тепловоспринимающего элемента, теплоносителя, стекла и изоляции, Дж/К; B – периметр канала, м; ρ – плотность теплоносителя, кг/м³; i – удельная энтальпия теплоносителя, Дж/кг; w_y – средняя скорость течения теплоносителя, м/с.

Учитывая, что расход и теплоёмкость теплоносителя постоянны, а периметр узкого канала приближённо равен ширине, получаем уравнение вида:

$$\frac{\partial \vartheta(y, \tau)}{\partial \tau} + \frac{KF}{\sum mc} \vartheta(y, \tau) + \frac{GC_{ТН}L}{\sum mc} \frac{\partial \vartheta(y, \tau)}{\partial y} = \frac{\gamma FE(\tau)}{\sum mc}, \tag{1}$$

где G и C_{TH} – расход и теплоёмкость теплоносителя соответственно, кг/с и Дж/(кг·К); L – длина ГК, м.

Полученное уравнение (1) дополняется начальным условием, которое определяется из соображений, что процесс начинается при достижении избыточной температуры неподвижного теплоносителя заданного значения:

$$\mathcal{G}(y, 0) = \mathcal{G}_{ЗД}. \quad (2)$$

В этот момент на вход в солнечный коллектор начинает поступать теплоноситель с постоянной избыточной температурой:

$$\mathcal{G}(0, \tau) = \mathcal{G}_{ВХ}. \quad (3)$$

Для решения краевой задачи (1)–(3) необходимо также задать функцию распределения интенсивности солнечной радиации в течение суток. В работе [3] показано, что изменение интенсивности солнечной радиации в течение дня можно аппроксимировать синусоидальной зависимостью вида:

$$E(\tau) = E_m \sin\left(\frac{\tau}{\tau_c} \pi\right), \quad (4)$$

где E_m – максимальное значение плотности теплового потока от Солнца, Вт/м²; τ_c – длительность светового дня, с.

Используя синусоидальное распределение интенсивности солнечной радиации, приведенная задача была решена в [4]. Решение получено аналитически, используя преобразования Карсона-Хевисайта. Такой подход трудно назвать универсальным, так как его применение возможно лишь при определённом задании функциональной зависимости $E(\tau)$. Кроме того, полученные аналитические выражения довольно громоздки, что снижает возможность проведения анализа. Более универсальным видится численный подход, который предлагается использовать в данном исследовании. Его универсальность заключается в том, что становится возможным задание функции распределения интенсивности солнечной радиации как аналитически, используя подходящие функциональные зависимости различных видов, так и точно, основываясь на данных климатических наблюдений.

Метод решения. Решение дифференциального уравнения переноса (1) в области $\{0 < y < L, \tau > 0\}$ с начальными и граничными условиями (2), (3) находилось численно с использованием явной конечно-разностной схемы "против потока" [5]. Такая схема является условно устойчивой, поэтому важным при расчёте является выбор шага по временной координате. Этот шаг должен удовлетворять условию:

$$\frac{a\Delta\tau}{\Delta y} = \sigma \leq 1,$$

где σ – число Куранта; a – коэффициент переноса, который представляет собой комплекс из динамических и геометрических характеристик ГК.

Для выполнения условия непрерывности начального и граничного условия в точке $y = 0$ будем считать $\mathcal{G}(0, 0) = \mathcal{G}_{ВХ}$.

Важным при проведении исследования является выбор фактического времени начала отсчёта. Как правило, разогрев ГК происходит при неподвижном теплоносителе, и подача необходимого расхода начинается лишь при достижении в неподвижном теплоносителе необходимой заданной температуры. Если не учитывать тепловую инерционность коллектора, то температура теплоносителя при нулевом расходе в каждый момент времени будет равняться температуре тепловоспринимающего элемента и соответствовать интенсивности солнечной радиации. Учёт тепловой инерционности элементов ГК несколько изменит его энергетические показатели. В [4] показано, что максимальное значение избыточной температуры достигается не в полдень, когда интенсивность солнечной радиации максимальна, а несколько позднее, причём значение этой температуры будет ниже, чем без учёта тепловой ёмкости. В работе рассчитано время разогрева ГК $\tau_{ЗД}$ при неподвижном теплоносителе до избыточной температуры, соответствующей заданному значению $\mathcal{G}_{ЗД}$. Это время было учтено при построении численного решения задачи (1)–(3).

Для лабораторного ГК площадью $F = 1,5 \text{ м}^2$ с суммарной теплоёмкостью элементов $\sum mc = 29500 \text{ Дж/К}$ и коэффициентом

тепловых потерь $K = 6,9 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ время разогрева равняется $\tau_{\text{зад}} \approx 3,5 \text{ ч}$. Избыточная температура при неподвижном теплоносителе при этом задавалась равной $\vartheta_{\text{зад}} = 35^{\circ}\text{C}$, а температура на входе в ГК соответствовала температуре окружающей среды и принималась равной $\vartheta_{\text{зад}} = 10^{\circ}\text{C}$. Значение интенсивности солнечной радиации выбиралось на основе локальной аппроксимации климатических данных.

Анализ результатов. На базе созданной математической модели (1)–(3) был разработан численный алгоритм, который лёг в основу создания программного модуля для проведения численных исследований. Результаты численного расчёта представлены на рис. 1.

Анализ графиков рис. 1 показывает, что для каждого поперечного сечения ГК характерным является наличие двух этапов теплообмена. На первом этапе температура теплоносителя растёт и не зависит от температуры на входе в теплообменный аппарат. Очевидно этот рост температуры связан с тем, что теплоноситель отбирает теплоту, накопленную вследствие теплоёмкости элементов ГК. Через какое-то время теплота, внесённая в канал движущимся теплоносителем, станет равной запасённой теплоте, что приведёт в данном случае к скачкообразному падению температуры. На втором этапе значение температу-

ры на входе и величина расхода теплоносителя будут решающими. Скачкообразное изменение температуры объясняется влиянием холодного теплоносителя, который подходит к рассматриваемому сечению. Глубину температурного скачка определяет разница температур $\vartheta_{\text{зад}} - \vartheta_{\text{вх}}$. Очевидно, что если эти температуры будут одинаковыми, то скачка наблюдаться не будет. На глубину температурного скачка влияет также расположение рассматриваемого сечения. Вблизи входа в канал влияние температуры на входе существенно, но по мере удаления от входа оно ослабевает и скачок имеет более сглаженную форму.

Качественное распределение температуры, аналогичное представленному выше, было получено в [4] при аналитическом решении задачи.

Для практических расчётов важным является оценка влияния температурного скачка на энергетические показатели ГК. Для этой оценки численным интегрированием было рассчитано количество теплоты, полученной от ГК за рассматриваемый промежуток времени. Это значение лишь на 3-5% было ниже, чем значение без учёта теплоёмкости. Такая инженерная погрешность позволяет сделать вывод о том, что при проведении практических расчётов в общем случае нет необходимости учитывать теплоёмкость элементов системы.

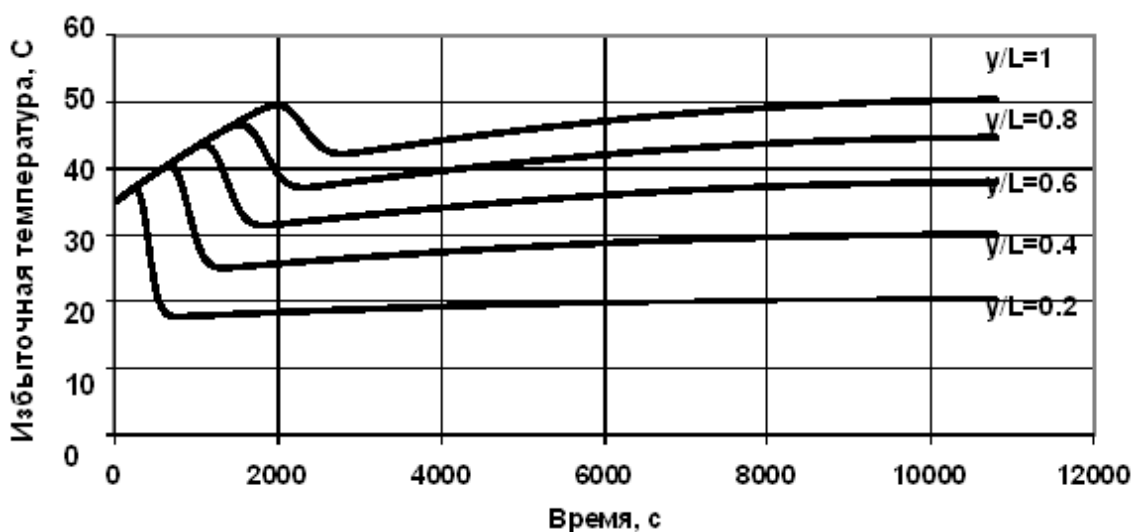


Рис. 1. Изменения температуры теплоносителя на режиме разогрева в разных сечениях ГК.

Выводы. Исследование тепловой инерционности солнечного коллектора проводилось численно с учётом динамики течения теплоносителя при реальном среднестатистическом распределении суточной интенсивности солнечной радиации. Проведенные расчёты показали наличие температурного скачка при работе солнечного коллектора, связанного с теплоёмкостью его элементов. Глубина этого скачка зависит от разности температур теплоносителей, одна из которых – это температура на входе в коллектор, а вторая – задаваемая температура, по достижению которой происходит подача расхода. Наличие температурного скачка практически не влияет на суммарные энергетические показатели солнечных

энергетических установок на основе гелиоколлекторов.

1. Даффи Дж. А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М.: Мир, 1977. – 413 с.
2. Воробьёв В.М., Рьльский А.М. и др. Анализ тепловых потерь гелиоколлектора в процессе его нагрева // Збірник наукових праць УкрДАЗТ. – 2012. – Вип. 132. – С. 57–61.
3. Жданов Ю.А. Расчёт солнечных систем горячего водоснабжения с суточным циклом аккумулирования тепла // Гелиотехника. – 1989. – №2. – С. 43–47.
4. Сиворакиа В.Ю., Марков В.Л. и др. Теплові розрахунки геліосистем. – Дніпропетровськ, 2003. – 124 с.
5. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. – М.: Наука, 1984. – 286 с.

УДК 661.68

К.В.Сімейко (Інститут газу НАН України, Київ)

Дослідження можливості карботермічного відновлення кремнію

Розглядається дослідження можливості карботермічного відновлення кремнію. У якості відновника використовують капсульований піроуглецем кварцовий пісок, який одержаний у реакторі з електротермічним псевдозрідженим шаром. Основна перевага даного матеріалу при використанні в якості сировини для карботермічного відновлення – відносна чистота в порівнянні з аналогічними відновниками, оскільки піроуглець був отриманий із газової фази. Проплавка капсульованого піроуглецем кварцового піску проводилась у графітовому тиглі в печі з індукційним нагрівом.

Наведено обґрунтування вибору дослідження і вдосконалення технології карботермічного відновлення, результати дослідів із плавлення капсульованого піроуглецем кварцового піску в індукційній печі, мікроскопічний аналіз одержаного матеріалу, результати термодинамічних розрахунків та перспективи подальших досліджень.

Ключові слова: сонячна енергетика, кремній, карботермічне відновлення, індукційна піч, піроуглець.

Рассматривается возможность карботермического восстановления кремния. В качестве восстановителя используют капсулированный пироуглеродом кварцевый песок, который получен в реакторе с электротермическим псевдооживленным слоем. Основное преимущество данного материала при использовании в качестве сырья для карботермического восстановления – относительная чистота в сравнении с аналогичными восстановителями, поскольку пироуглерод был получен из газовой фазы. Проплавка капсулированного пироуглеродом кварцевого песка проводилась в графитовой тигле в печи с индукционным нагревом.

Приведено обґрунтування вибору дослідження і совершенствования технологии карботермического восстановления, результаты опытов с плавлением капсулированного пироуглеродом кварцевого песка в индукционной печи, микроскопический анализ полученного материала, результаты термодинамических расчетов, а также перспективы дальнейших исследований.

Ключевые слова: солнечная энергетика, кремний, карботермическое восстановление, индукционная печь, пироуглерод.

Вступ. Сонячна фотоенергетика належить до галузей світової економіки, які швидко розвиваються. До 2015 року прогнозується збільшення загальносвітових потужностей фотоенергетики від 16,8 до 85 ГВт у порівнянні з 1,2 ГВт у 2004

році [1]. Поряд із перевагами використання сонячної енергетики, на сьогоднішній день вона є найбільш дорогою технологією одержання електроенергії. Кремній займає провідне місце серед напівпровідникових матеріалів, що використо-