Uzbek Journal of Physics
DOI: https//doi.org/10.52304/.v25i3.445

Исследование нестационарных тепловых потерь в плоских солнечных коллекторах

Ш.И. Клычев[*1], С.А. Бахрамов[1], И.Г. Кенжаев[2], Ж.Ж. Турсунбаев[2], Ш.А. Маразаков[2]

[1]Научно-технический центр с конструкторским бюро и опытным производством АН РУз, ул. Дўрмон йўли, 33, 100125, Ташкент, Узбекистан
[2]Ошский государственный университет, ул.Ленина 331, 714000, Ош, Кыргызстан

Получена 27.01.2023, revised 21.09.2023

* Corresponding author: e-mail: klichevsh@ list.ru,Phone: +998 93 102 25 49

Исследованы дневные тепловые потери и температуры теплоносителя на выходе плоских солнечных коллекторов (СК) с учетом переменности плотности падающего солнечного излучения на СК. Исследования проводили на основе разработанной одномерной трехслойной распределенной нестационарной тепловой модели плоской одноканальной СК с неселективным приемником, учитывающей изменение температур по длине СК. Показано, что основные теплопотери в СК в летнее время – это излучения с прозрачного ограждения (ПО) до 78% и с теплоизоляции днища 15%, конвективные теплопотери составляют около 7%, из них в ПО около 5.5% и 1.5% в изоляции. Эти показатели и температуры теплоносителя на выходе из СК существенно переменны в течение дня, что необходимо учитывать при определении кпд СК. Показано, что улучшение тепловых характеристик СК, в первую очередь, зависит от возможности уменьшения потерь излучением с ПО. Уменьшение тепловых потерь СК за счет увеличения толщины теплоизоляции ограничено из-за малых тепловых эффектов.

Ключевые слова: солнечное излучение, нестационарный радиационный и конвективный теплообмен, метод конечных разностей, граничные условия.

Daytime heat losses and coolant temperatures at the outlet of flat-plate solar collectors (SC) are studied taking into account the variability of the density of incident solar radiation on the SC. The studies were carried out on the basis of the developed one-dimensional three-layer distributed non-stationary thermal model of a flat single-channel SC with a non-selective receiver, which takes into account temperature changes along the length of the SC. It is shown that the main heat losses in the SC in summer are up to 78% by radiation from the transparent enclosure (TE), and from the thermal insulation of the bottom 15%, convective heat loss is about 7%, of which about 5.5% in the TE and 1.5% in the insulation. These indicators and the temperature of the coolant at the outlet of the SC have variable values during the day, which must be taken into account when applying the efficiency factor of the SC. It is shown that the improvement of the thermal characteristics of the TE, first of all, depends on the possibility of electromagnetic radiation from the TE. Reducing the heat losses of the SC by increasing the thickness of the thermal insulation is limited due to small thermal effects.

Keywords: solar radiation, nonstationary radiative and convective heat transfer, finite difference method, boundary conditions.

I. Введение

Солнечные тепловые установки, в частности, плоские солнечные коллектора (СК), являются одним из ранних способов энергосбережения при получении горячей воды и отоплении зданий. Однако масштабы их использования, ообенно в последние годы, перестают расти. Отчасти это связано с успехами солнечной фотовольтаики [1-5]. Однако, главный фактор – это низкая энергетическая плотность солнечного излучения, которая

сравнима с плотностями потоков энергии в окружающей среде. Это приводит к существенной зависимости характеристик СК (кпд или тепловые потери, температура нагрева воды (теплоносителя), стоимость энергии) от факторов внешней среды (температур неба t_r, земли (сооружений) t_e, воздуха t_c, скорости ветра $V_в$) и собственно плотности солнечного излучения E_C. [1-5]. Тепловые потери СК в первом приближении определяются температурами нагрева и радиационными характеристиками (α, ε) наружных поверхностей прозрачного ограждения (ПО) – $t_{ПО}$, $\alpha_{ПО}$ ($\varepsilon_{ПО}=\alpha_{ПО}$), лучевоспринимающей поверхности приемника (П) – $t_П$, $\alpha_П$, (обычно в плоских СК также $\varepsilon_П=\alpha_П$) и теплоизоляции днища (И) – $t_И$, $\alpha_И$ ($\varepsilon_И=\alpha_И$) (рис. 1).

Схема одномерной плоской СК, включающей прозрачное ограждение (ПО), приемник (П) с каналами для теплоносителя и теплоизоляцию дна (И) приведена на рис. 1.

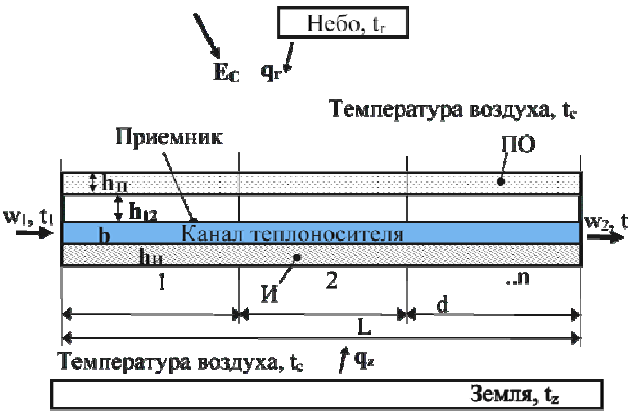


Рисунок 1. Одномерная схема плоской СК длиной L (шириной A) с разбиением по длине на n одинаковых участков. n – число разбиений СК на участки; d – длина участка; $h_П$ – толщина ПО, h_{12} – воздушный зазор между ПО и П, b – высота канала П, h_i – толщина теплоизоляции.

И если радиационные характеристики этих поверхностей относительно постоянны, то температуры их нагрева – результат внешнего и внутреннего теплообмена в СК и параметров (температуры и скорости теплоносителя на входе в СК (w_1, t_1) и на выходе (w_2, t_2)). Для разработки методов и решений по уменьшению тепловых потерь, в общем случае конвекцией ($Q_К$) и излучением ($Q_И$), необходимо знать собственно их величны и соотношения между ними.

Многофакторность задачи и их переменность даже в течение дня существенно усложняют экспериментальный и расчетный анализ характеристик СК. В связи с этим до сих пор в основном проводится параметрический анализ характеристик СК – исследуется влияние отдельных параметров при заданных остальных в предположении стационарного режима работы СК [6-12]. Это приводит к тому, что до настоящего времени имеются существенные расхождения между расчетными и реальными характеристиками СК [13, 14].

Такой подход не учитывает взаимосвязанности параметров теплообмена, а также тепловую инерцию элементов СК. Для этого были разработаны одномерные нестационарные единичные и распределенные тепловые модели СК [15-17]. Было показано, что тепловая инерция приводит к тому, что время выхода СК на стационарный режим, даже при постоянной солнечной радиации, составляет 1–1.5 часа. Можно отметить, что единичная модель [15] не позволяет учитывать переменность температур теплоносителя и поверхностей теплообмена и соответственно переменность тепловых потерь в теплоносителе. В распределенных моделях [16, 17] не учитывался основной фактор – изменение плотности солнечного излучения, падающего на обычно неподвижную СК в течение дня. Т.е. собственно не определялись дневные характеристики СК и её дневная производительность.

Цель настоящей работы исследование нестационарных тепловых потерь $Q_К$, $Q_{Из}$ и соотношений между ними в плоской СК с учетом переменности солнечного излучения и параметров окружающей среды и разработка на этой основе рекомендаций по улучшению теплотехнической эффективности СК.

II. Методика исследования

Исследование дневных тепловых потерь СК проводится на основе одномерной трехслойной нестационарной распределенной теплообменной модели [16, 17], дополненной блоками учета переменности во времени плотности падающего на СК (обычно на ПО) солнечного излучения, и ориентации СК – углы азимута (A_C) и высоты (h_C). Для более точного определения температуры теплоносителя на выходе увеличено число разбиений СК по длине до 10.

Плотность солнечного излучения, падающего на ПО $E_{C,ПО}$, зависит от положения Солнца и ориентации СК, или от косинуса угла падения

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

солнечного луча i (угол между солнечным лучом и нормалью к ПО). Анализ показывает, что для неподвижных СК основной фактор – это косинус угла падения, поэтому изменение $E_{С,ПО}$ во времени определяем в виде $E_{С,ПО}=E_С\cos i$ ($E_С$ – нормальная плотность солнечного излучения, которая почти постоянна в течение большей части дня [2]). Во внутреннем теплообмене в СК между ПО и П учитываются потоки эффективного излучения и конвекции по механизму неограниченного объема, [18, 19]. Конвективные потоки от внутренней стенки П к теплоносителю и от него к теплоизоляции определяли по формулам для пластины, т.е. рассматривается один канал, а распределение температур по толщине ПО, И и от лучепоглощающей поерхности к стенке канала (шириной A и высотой b) приемника определяли методом конечных разностей с разбиением их по толщине на 8–10 слоев.

III. Результаты и обсуждение

Изучение тепловых процессов в СК и тепловых потерь излучением и конвекцией с ПО и И было проведено для следующих параметров элементов СК: ПО – стекло толщиной 4 мм (плотность ρ=2550 кг/м^3, теплоемкость c = 779 Дж/кг°С, теплопроводность λ=0.8 Вт/м°С, коэффициенты поглощения β были равны в области длин волн $\lambda\le$2.7 мкм, β_1=0.6 см$^{-1}$, а при $\lambda>$2.7 мкм β_2=8 см$^{-1}$). В модели поглощения ПО лучистых потоков принято, что солнечное излучение поглощается в объеме, а тепловое излучение с длинами волн $\lambda>$2.7 мкм поглощается на поверхностях ПО с интегральными поглощательной α и излучательной ε способностями, равными 0.96 (зеркальное отражение от поверхностей ПО R_Z=0.04); теплоизоляция – дерево толщиной h_i (ρ=546 кг/м^3, c=2720 Дж/кг°С, λ=0.15 Вт/м°С), интегральные коэффициенты поглощения и излучения $\alpha_И = \varepsilon_И$ =0.8; приемник (металл) – один канал высотой b = 5 мм, шириной A = 1 м и длиной L = 1 м, (ρ = 7900 кг/м^3, c = 462 Дж/кг°С, λ = 45.4 Вт/м°С) с коэффициентами поглощения солнечного излучения $\alpha_П=\varepsilon_П$=0.9. Температура воды на входе в канал приемника СК t_1 равна 20°С. Предварительные исследования показали, что для обеспечения в этой СК достаточно высоких температур нагрева теплоносителя скорость её течения должна быть порядка 0.0005 м/с (9 кг/час).

Для летнего времени (склонение Солнца δ = 23.5°) СК устанавливали горизонтально ($A_С$ = 0, $h_С$ = 90°, широта места φ = 41°). Расчеты начинали примерно за час до восхода Солнца с начальной температурой СК, равной t_1. Процесс теплообмена рассматривался и некоторое время после захода Солнца. Дневные тепловые потери СК конвекцией $Q_К$ и излучением $Q_И$ с ПО и И при $h_И$ = 2 см для случая естественной конвекции (коэффициент конвективной теплоотдачи $\alpha_К$ на поверхности ПО 5 Вт/м^2°С, а И около 2 Вт/м^2°С) при температуре поверхности земли t_e = 20°С, неба t_r = 0°С, $E_С$ = 700 Вт/м^2, $t_С$ = 25°С приведены на рис. 2. Там же приведены суммарные потери СК Q_S. Как видно, характер изменения тепловых потерь излучением и конвекцией в течение дня заметно различен, как для ПО, так и И. Если в утренние часы (восход Солнца около 4.67 часа) конвективные потери в ПО и И даже отрицательны (СК не теряет, а в данном случае, когда $t_С>t_1$, даже получает тепло от окружающего воздуха. В то же время температура воды на выходе из-за потерь излучением все же уменьшается до 5.2 часа. Далее, примерно с 8.00 до 16.00, потери излучением с ПО растут почти линейно (это означает, что мгновенные тепловые потери становятся практически постоянными).

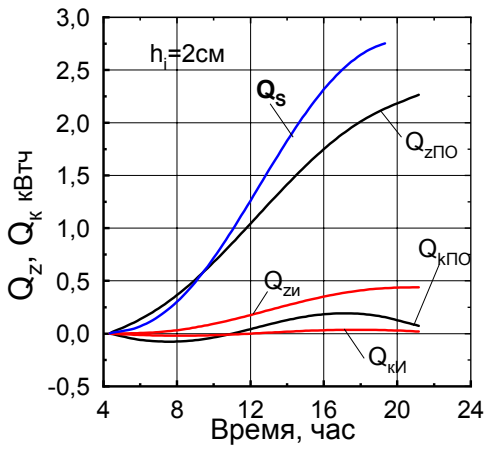


Рисунок 2. Тепловые потери ПО (излучением $Q_{zПО}$ и конвекцией $Q_{кПО}$) и И (излучением $Q_{zИ}$ и конвекцией $Q_{кИ}$) СК при естественной конвекции и толщине теплоизоляции $h_И$ = 2 см.

Также можно видеть, что для данных параметров окружающей среды (май-сентябрь) потери излучением значительно превышают потери конвекцией как в ПО, так и в изоляции.

Можно отметить, что хотя методики расчета теплопотерь в низкотемпературных процессах

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

основаны на формулах конвективного теплообмена, на практике часто используют коэффициенты конвекции, определяемые экспериментально, которые, хотя и приближенно, все же учитывают и потоки излучением [20, 21].

На рис. 3 приведены теплопотери СК с большей толщиной теплоизоляции. Как видно, характер потерь существенно не меняется. Практически не изменились тепловые потери с ПО и только незначительно с 0.43 кВтч до 0.32 кВтч уменьшились потери излучением с И, а конвективные почти не изменились.

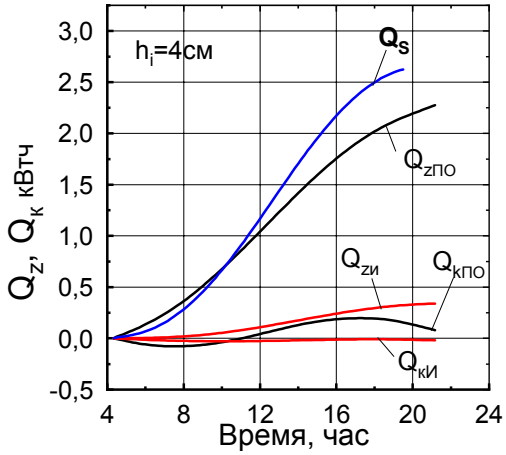


Рисунок 3. Тепловые потери ПО и И СК излучением и естественной конвекцией при толщине теплоизоляции h_i = 4 см.

В целом можно видеть, что значительная часть дневных теплопотерь происходит с прозрачного ограждения и в основном излучением.

Такой характер тепловых потерь обусловлен взаимосвязанностью системы СК-окружающая среда, а увеличение толщины теплоизоляции и соответственно тепловой инерции СК приводит только к разным закономерностям изменения температуры в элементах СК и теплоносителя на выходе. При этом для одинаковых условий среды независимо от толщины теплоизоляции практически одинаковыми остаются суммарные теплопотери. Так, из рис. 2 и 3 следует, что различие между ними составляет только около 5%. Аналогичные исследования для зимних условий (t_z=0°C, t_c=0°C, склонение δ=–23.5°) при толщине теплоизоляции от 2 см до 8 см показали, что уменьшение суммарных теплопотерь относительно СК также изменяются незначительно, т.е. суммарные теплопотери ПО и в зимнее время практически не зависят от толщины теплоизоляции. При этом в зимнее время конвективные потери в ПО сравниваются с потерями излучением, но в теплоизоляции они остаются меньше потерь излучением примерно в 1.7 раза. Из полученного также следует, что выбор параметров СК на основе параметрического анализа в предположении стационарного режима работы СК недостаточен, необходима нестационарная тепловая модель СК с анализом её как минимум дневных характеристик. Различие в технико-экономических характеристиках СК, получаемых на основе этих подходов, может быть существенным.

Так, например, по нестационарной модели толщина теплоизоляции дна СК в наших климатических условиях в весенне-летнее время может быть достаточно малой, порядка 2 см, и только для поздней осени и зимы может быть увеличена до 4 см. Отметим, что в настоящее время рекомендуемая толщина теплоизоляции составляет около 6 см.

В конечном счете, меры по уменьшению тепловых потерь СК проявляются в температурах теплоносителя t_2 на выходе из СК (рис. 4).

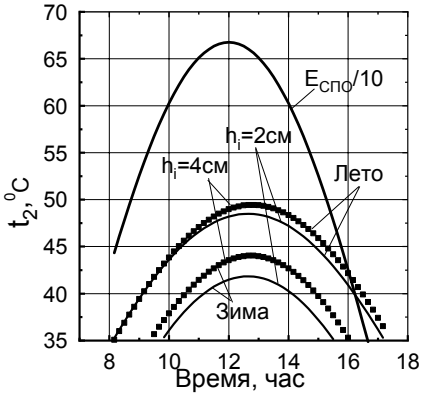


Рисунок 4. Температура воды t_2 на выходе из СК оптимальной ориентации от времени дня при различных h_i и сезоне года.

Как видно, летом при h_i=2 см максимальное t_2 может составить 48.5°C, а при h_i=4 см около 49.5°C, т.е. разница всего 1°. Также немного различен и характер изменения температуры из-за увеличения тепловой инерции. Так, до 10 часов утра t_2 для h_i=4 см, даже чуть меньше, чем для h_i=2 см, но далее она начинает превышать. В зимнее время влияние толщины теплоизоляции больше и разница составляет около 2°C. На

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

практике переменны не только солнечное излучение, но и параметры окружающей среды, в первую очередь, это температура неба и скорость ветра. Результаты влияния этих параметров на температуру воды на выходе из СК относительно t_2 для СК с h_i = 2 см (рис. 4) и вариантов: 1 – J=1 (h_i=4 см, $\alpha_К$ – естественная конвекция, t_r = 0°С); 2 – J=2 (h_i=4 см, $\alpha_{КПО}$=$\alpha_{КИ}$=25 Вт/м^{2}К – характеризуют наличие ветра, t_r = 0°С); 3 – J=4 (h_i = 2 см, $\alpha_К$ – естественная конвекция, t_r = 10°С), приведены на рис. 5.

Как видно, влияние изменения этих параметров в общем мало и находится в пределах ±5%. В целом можно утверждать, что для заметного улучшения тепловых характеристик СК необходимо, в первую очередь, уменьшение тепловых потерь с ПО, особенно потерь излучением.

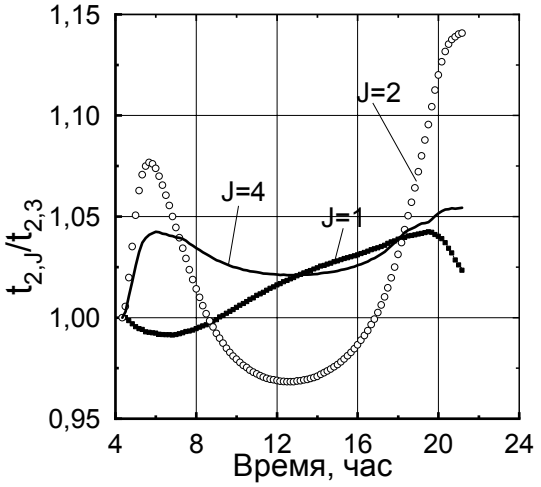


Рисунок 5. Относительное изменение температуры воды на выходе из СК при различных условиях среды.

IV. Заключение

Тепловые характеристики плоских солнечных коллекторов, особенно температура теплоносителя на выходе, существенно переменны в течение дня и должны учитываться при определении производительности СК.

Показано, что в СК основным источником тепловых потерь является прозрачное ограждение, при этом в летнее время в основном это потери излучением, составляющие до 78% общих теплопотерь, а в зимнее время тепловые потери излучением и конвекцией с ПО примерно равны и составляют около 70–76% общих теплопотерь. Для разработки мер по уменьшению тепловых потерь в ПО необходимо, в частности, развитие численных моделей теплообмена в ПО, учитывающих не только коэффициенты поглощения, но и переизлучение и отражение собственного излучения на внутренних границах таких полупрозрачных сред.

Суммарные конвективные тепловые потери в СК при естественной конвекции составляют летом около 7%, из них в ПО 6%. Тепловые потери конвекцией с ПО зимой составляет от 30% до 17.6% от суммарных при изменении толщины теплоизоляции дна СК h_i от 2 см до 8 см, при этом конвективные потери с теплоизоляции составляют от 11% до 6%. Отсюда следует, что меры по уменьшению тепловых потерь СК за счет увеличения толщины теплоизоляции существенно ограничены как по тепловой эффективности, так и экономически.

Метаданные

Investigation of nonstationary heat losses in flat solar collectors

Sh.I. Klychev[1], S.A. Bakhramov[1], I.G. Kenzhaev[2], Zh.Zh. Tursunbaev[2], Sh.A. Marazakov[2]

[1]Scientific and technical center with a design bureau and pilot production of the Academy of Sciences of the RUz, Durmon yoli str., 33, 100125, Tashkent, Uzbekistan
[2]Osh State University, Lenin st., 331, 714000, Osh, Kyrghyzstan

Daytime heat losses and coolant temperatures at the outlet of flat-plate solar collectors (SC) are studied taking into account the variability of the density of incident solar radiation on the SC. The studies were carried out on the basis of the developed one-dimensional three-layer distributed non-stationary thermal model of a flat single-channel SC with a non-selective receiver, which takes into account temperature changes along the length of the SC. It is shown that the main heat losses in the SC in summer are up to 78% by radiation from the transparent enclosure (TE), and from the thermal insulation of the bottom 15%, convective heat loss is about 7%, of which about 5.5% in the TE and 1.5% in the insulation. These indicators and the temperature of the coolant at the outlet of the SC have variable values during the day, which must be taken into account when applying the efficiency factor of the SC. It is shown that the improvement of the thermal characteristics of the TE, first of all, depends on the possibility of electromagnetic radiation from the TE. Reducing the heat losses of the SC by increasing the thickness of the thermal insulation is limited due to small thermal effects.

Keywords: solar radiation, nonstationary radiative and convective heat transfer, finite difference method, boundary conditions

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.

Литература (References)

[1] R.R. Avezov, A.Yu. Orlov. Solnechnye sistemy otopleniya i goryachego vodosnabzheniya (Tashkent, Fan, 1988), 284s.
[2] John A. Duffie, William A. Beckman. Solar Engineerng of Thermal Processes. Fourth Edition (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken; New Jersey Published simultaneously in Canada. 2013, 928 pp.
[3] O.S. Popel', S.E.Frid. Teploenergetika No.1, 12-18 (2003).
[4] A.I.Almaev, I.A. Lushkin. Vestnik NGIEI, No.6, 16-20 (2015).
[5] Sh.I. Klychev, A.I. Ismanzhanov, N.S. Sadykova, M. Samiev, A.U. Sajfiev. Geliotekhnika No.3, 65-69 (2013).
[6] V.A. Baum, N. Ovezsahatov. Geliotekhnika No.1, 40-43 (1976).
[7] T. Baymatov, U.Kh. Gaziev, Sh.I. Klychev. Geliotekhnika No.3, 59-62 (1985).
[8] R.R. Avezov, A.U. Vohidov, E.Yu. Rahimov, M.A. Kuralov. Geliotekhnika **55**, No.4, 343-353 (2019).
[9] N.R. Avezova, A.U. Vokhidov, D.U. Abdukhamidov, E.Yu. Rahimov. Geliotekhnika No3, 17-21 (2016).
[10] R.R. Avezov, K.B.Babakulov. Geliotekhnika No.3, 31-34 (1980).
[11] A.R. Fert, M.A. Ajzen, A.A. Vodop'yanov. Geliotekhnika No.4, 57-60 (1984).
[12] N.R. Avezova, R.R. Avezov. Geliotekhnika No.2, 9-13 (2016).
[13] M.S. Kalashyan, O.S. Popel', S.E. Frid. Geliotekhnika No.4, 69-73 (1986).
[14] E.A. Buzoverov, M.V. Isaev. Geliotekhnika No.2, 141-146 (2020).
[15] Sh.I. Klychev, A.A. Ismanzhanov, S.A. Bahramov, R.A. Zahidov, M. Samiev. Geliotekhnika No.1, 29-31 (2007).
[16] Sh.I. Klychev, O.H. Nizomov, D.E. Kadyrgulov. Geliotekhnika No.1, 37-40 (2017).
[17] SH.I. Klychev, S.A. Bahramov, A.I. Ismanzhanov, Yu.A. Dudko, M. Samiev. Geliotekhnika No.3, 27-31 (2008).
[18] Teploenergetika i Teplotekhnika, Obshchie voprosy, kniga 1. Spravochnik. Pod red. Grigor'eva V.A., Zorina V.M. (Mos-cow, Energoizdat, 1987), 455 p.
[19] M.A. Miheev, I.M. Miheeva. Osnovy teploperedachi (Moscow, Energiya, 1973).
[20] O.B. Demin. Fiziko-tekhnicheskie osnovy proektirovaniya zdanij i sooruzhenij. Chast' 2. Teplozashchita zdaniy. Uchebnoe. posobie (Tambov, 2004).
[21] A.N. Shihov, D.A. Shihov. Arhitekturnaya i Stroitel'naya Fizika. Uchebnoe posobie (Perm', Izd-vo FGBOU VPO Permskaya GSKHA, 2013).

Ясси қуёш коллекторлардаги ностационар иссиқлик йўқотишларини ўрганиш

Ш.И. Кличев[1], С.А. Бахрамов[1], И.Г. Кенжаев[2], Ж.Ж. Турсунбаев[2], Ш.А. Маразаков[2]

[1] ЎзР ФА Конструкторлик бюроси ва тажрибавий ишлаб чиқариш илмий техник маркази. Дўурмон йули куч. 33, 100125, Тошкент Ўзбекистон.
[2] Ош давлат университети, Ленин куч. 331, 714000, Ош, Қирғизстон.

Қуёш коллекторлардаги кунлик иссиқлик йўқотишлари ва чиқадиган иссиқ сувни ҳарорати қуёш нурларини ўзгариши ҳисобга олинган ҳолда ўрганилди. Бу изланишлар яратилган ясси қуёш коллекторни бир ўлчамли уч қатламли ностационар тақсимланган иссиқлик модели асосида олиб борилган. Тадқиқотлар натижасида ёзда иссиқлиқ йўқотишлар асосан шаффоф тўсиқдан 78%, иссиқлик изоляциясидан 15%, конвектив йўқотишлар 7%, ўлардан 5.5% шаффов тусиқдан ва 1.5% иссиқлиқ изоляциясидан. Бу кўрсаткичлар ва коллектордан чиқадиган сувни ҳарорати кун давомида сезиларли ўзгаради ва коллекторларни самарадорлигини аниқлашда ҳисобга олиниши керак. Коллекторларни кўрсаткичларини яхшилаш учун, биринчи навбатда нурланиш йўқотилишларини камайтириш имкониятига боғлиқ. Иссиқлик изоляциясининг қалинлигини ошириш орқали коллекторни иссиқлик йўқотишларини камайтириш имкониятлари кам ва чекланган.

Калит сўзлар: қуёш нурланиши, ностационар радиацион ва конвектив иссиқлик алмашинуви, чекланган фарқлар усули, чегара шартлари.

©Академия наук Республики Узбекистан, 2023 г.