

3. Кучинський В.П., Рєзцов В.Ф., Суржик О.М. Комбінований фототермічний модуль. Деклараційний патент України на корисну модель № 51073, Н01L31/058, 2010. (Бюл.№ 12 2010).
 4. Сафонов В.А., Кувишинов В.В. Фотоелектрические модули с плоскими концентраторами // Відновлювана енергетика. – 2008. – № 4 (15). – С. 28–33.
 5. www.comsol.com
 6. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.

7. Platabo N. Transient heat conduction problems in power cables solved by the finite element method // IEEE Trans. – 1973. – V. PAS-92. – N.1. – P. 56–63.
 8. Теоретические основы теплотехники: Справочник / Под. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. – М.: Энергоатомиздат, книга 2, 1988. – 560 с.
 9. Кучинський В.П., Ситицын Н.П., Суржик А.Н., Шевчук В.И. Методика определения тепловых характеристик фототермических модулей // Відновлювана енергетика. – 2006. – 4 (7). – С. 44–47.

УДК 697.329

О.И.Горбатьх, В.В.Макаров, канд.техн.наук (Севастопольский национальный технический ун-т, Севастополь)

Расчёты КПД солнечных коллекторов в трёхкаскадных системах солнечного ГВС

В работе рассматриваются математические модели расчёта КПД солнечных коллекторов с прозрачной и тильной изоляцией, которые составляют третий каскад трёхкаскадной системы солнечного ГВС. Представлена относительная погрешность математических моделей в сравнении с данными испытаний. Приведены средние месячные КПД третьего каскада рассчитанных математических моделей для климатических условий г. Севастополя. Разработан уточнённый алгоритм расчёта КПД солнечных коллекторов третьего каскада.

У роботі розглядаються математичні моделі розрахунку ККД сонячних колекторів із прозорою та тильною ізоляцією, котрі складають третій каскад трикаскадної системи сонячного ГВП. Наведена відносна похибка математичних моделей у порівнянні з даними випробувань. Наведено середньомісячні ККД третього каскаду розрахованих математичних моделей для кліматичних умов м. Севастополя. Розроблено уточнений алгоритм розрахунку ККД сонячних колекторів третього каскаду.

В работе [1] рассмотрена трёхкаскадная гелиоустановка системы ГВС в неотапливаемый период (рис. 1).

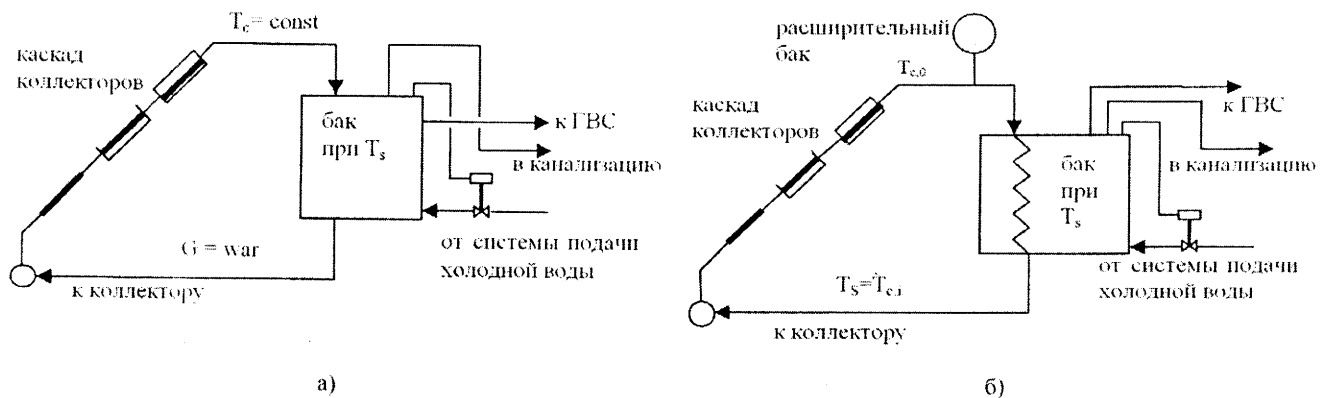


Рис. 1. Схема каскадной гелиоустановки системы ГВС: а) одноконтурная; б) двухконтурная.

Одной из основных задач при проектировании системы солнечного теплоснабжения является обеспечение минимальных капитальных затрат

при её строительстве и эксплуатации с учётом гарантированных (заданных заказчиком) тепловых характеристик. Основные затраты определя-

ются
 погл
 40-50
 базир
 тепло
 терис
 в сис
 С
 тепло
 (СК),
 в теп
 ности

 где η
 и тр
 средн
 ной р
 колл
 горяч
 темпер
 выход
 третье
 Из
 КПД
 кого с
 КПД с
 цией и
 самог
 ющей
 чения,
 рость
 ние К
 чу. Рас
 изоляц
 ряд нек
 в целом
 дачи. К
 1.
 2.
 ют равн
 трубам.
 3.
 тие и чер
 са являе

ются стоимостью и величиной площади солнцепоглощающей поверхности, которые составляют 40-50% от капитальных затрат. Основа расчёта базируется на решении задач теплового баланса и теплопередачи, в определении расходных характеристик теплоносителя и гидравлических потерь в системе.

Основным элементом в системе солнечного теплоснабжения является солнечный коллектор (СК), который преобразовывает солнечную энергию в тепловую. Площадь солнцепоглощающей поверхности каскадов определяется по формуле [1]:

$$A_{1,2,3} = \frac{1,16 \cdot G \cdot \Delta t_i}{\eta_{1,2,3} \cdot \sum g_i}, \quad (1)$$

где $\eta_{1,2,3}$ – КПД расчётного месяца первого, второго и третьего каскада соответственно; $\sum g_i$ – среднесуточная интенсивность падающей солнечной радиации расчётного месяца в плоскости коллектора, Вт·ч/м²; G – необходимое количество горячей воды в сутки, кг/сут; Δt_i – разность температур расчётного месяца между входом и выходом из коллектора первого, второго и третьего каскада соответственно.

Из (1) вытекает, что величина A зависит от КПД СК, который является мерой его технического совершенства и оказывает влияние на общий КПД системы. КПД СК является сложной функцией и зависит как от технического совершенства самого коллектора, так и от параметров окружающей среды (плотность потока солнечного излучения, температура окружающего воздуха, скорость ветра и др.). Поэтому детальное исследование КПД СК представляет весьма сложную задачу. Рассмотрим расчёт КПД для СК с прозрачной изоляцией (третьего каскада). При этом делается ряд некоторых допущений, которые не искажают в целом картину теплового баланса и теплопередачи. К основным допущениям можно отнести:

1. Процесс теплопередачи стационарный.
2. Гидравлические коллекторы обеспечивают равномерное распределение теплоносителя по трубам.
3. Тепловой поток через прозрачное покрытие и через теплоизоляцию нижней стенки корпуса является одномерным.

4. Потери через прозрачную изоляцию и нижнюю стенку коллектора происходят в окружающую среду, имеющую постоянную температуру.

В работе [1] для определения среднесуточного КПД системы третьего каскада (с прозрачной изоляцией) используется уравнение Хоттеля-Уиллера-Бласса:

$$\eta_3 = F'' \left[(\alpha\beta) - \frac{\sum U_L'' \cdot (\Delta T)''}{I_i} \right], \quad (2)$$

где $F''(\alpha\beta)$ – конструктивная эффективность солнечных коллекторов третьего каскада, $(\alpha\beta) \equiv \theta$; U_L'' – среднесуточные тепловые потери расчётного месяца для третьего каскада коллекторов; $\Delta T''$ – среднесуточная разность температур расчётного месяца между нагреваемой средой и температурой воздуха для третьего каскада; I_i – среднесуточный уровень солнечной радиации, Вт·ч/м².

Среднесуточные КПД СК в [2] рекомендуется рассчитывать по уравнению:

$$\eta = \frac{Q_{пл}}{Q_{пад}} = F_R \left[\theta - \frac{U_L(t_1 - t_a)}{\sum g_i} \right], \quad (3)$$

где $Q_{пл}$ – полезная тепловая энергия, переданная движущемуся в СК теплоносителю; $Q_{пад}$ – падающая солнечная энергия в плоскость СК; F_R – коэффициент отвода тепла из коллектора, рассчитывается по формуле [2]:

$$F_R = \frac{G \cdot c_p}{U_L} \left(1 - e^{-U_L F V G c_p} \right), \quad (4)$$

где G – расход теплоносителя, кг/(м²·с); c_p – удельная изобарная теплоёмкость теплоносителя, Дж/(кг·К); U_L – коэффициент тепловых потерь СК в окружающую среду, Вт/(м²·К); θ – приведенный оптический коэффициент; t_1 – температура жидкости на входе в коллектор, °С; t_a – средняя дневная температура воздуха, °С; g_i – среднесуточная интенсивность падающей солнечной радиации в плоскости коллектора, Вт/м².

В нормативном документе [3] ВСН 52-86 "Установки солнечного горячего водоснабжения.

Нормы проектирования" КПД определяется по формуле:

$$\eta = 0,8 \left\{ \theta - \frac{U_L [t_{ж} - t_a]}{\sum g_i} \right\}, \quad (5)$$

где $t_{ж}$ – температура воды в коллекторе, °С, $t_{ж} = 0,5(t_1 + t_2)$. Коэффициент 0,8, принятый в формуле (5), есть не что иное, как F' [4]. В данном уравнении $F' = \text{const} = 0,8$ не учитывает конструктивные особенности СК и режим его работы. Однако он является функцией ряда переменных. Для СК типа "лист" либо "пластина" F' определяется по уравнению [4]:

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{U_L}}, \quad (6)$$

где $1/\alpha$ – коэффициент термического сопротивления от стенки пластины к жидкости; λ – коэффициент теплопроводности пластины (листа); δ – толщина пластины (листа), м.

Для СК "лист-труба" F' определяется по уравнению [2]:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i \alpha} \right]}, \quad (7)$$

где W – расстояние между центрами труб, м; D – внешний диаметр трубы, м; F – эффективность

ребра; C_b – проводимость соединения листа с трубой; D_i – внутренний диаметр трубы, м; $1/\pi D_i \alpha$ – коэффициент термического сопротивления от стенки трубы к жидкости.

В [5] рекомендуется КПД СК представлять в его технической документации изготовителем. При отсутствии этого значения предлагается зависимость:

$$\eta = 0,82 - 0,007(t_2 - t_a), \quad (8)$$

где t_2 – температура воды на выходе из коллектора (ограничена, не более 50°C).

Для оценки эквивалентности уравнений (3), (5), (8) были использованы результаты испытаний опытного СК "лист-труба" (рис. 2) с параметрами абсорбера: $D = 0,014$ м; $D_i = 0,012$ м; $W = 0,065$ м.

Обработка и определение КПД опытного СК осуществлялось по формулам:

$$Q_k = \frac{G \cdot c_p}{A} \cdot \Delta t; \quad (9)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1; \quad (10)$$

$$\eta = \frac{Q_k}{E} = f \left(\frac{t_{ж} - t_a}{E} \right); \quad (11)$$

$$t_{ж} = \frac{t_2 + t_1}{2}, \quad (12)$$

где E – плотность потока суммарной радиации в плоскости коллектора, Вт/м²; A – площадь тепловоспринимающей поверхности, м².

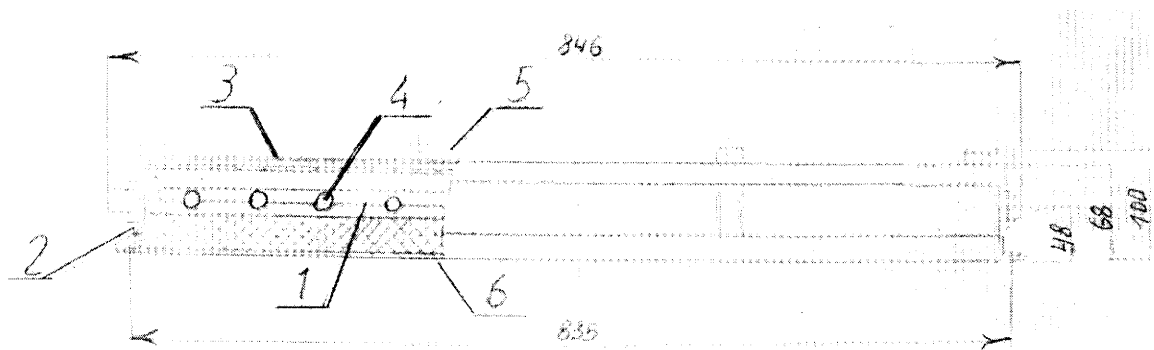


Рис. 2. СК "лист-труба":

1 – поглощающая панель; 2 – корпус; 3 – крышка; 4 – труба;
5 – стекло оконное; 6 – теплоизоляция.

Результаты испытаний опытного СК и их обработка представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний опытного СК и их обработка

	$A, \text{ м}^2$	$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$	$\Delta t, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{вс}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_{\text{в}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$G, \text{ кг/ч}$	$E, \text{ Вт/м}^2$	$Q_{\text{к}}, \text{ Вт/м}^2$	η
1	1,17	40,8	54,1	13,3	47,5	24,1	30,2	727,3	396,7	0,55
2		41,7	54,9	13,2	48,3	24,5	31,0	727,3	405,4	0,56
3		41,4	55,0	13,7	48,2	24,5	30,8	727,3	416,6	0,57
4		55,1	66,0	10,9	60,6	24,0	31,6	735,3	341,5	0,46
5		18,4	38,0	19,6	28,2	21,2	25,1	709,7	487,9	0,69
6		17,6	38,0	20,4	27,8	22,0	25,4	704,1	511,9	0,73
7		31,7	47,6	15,9	39,7	23,2	28,4	707,3	446,9	0,63
8		32,1	47,3	15,3	39,7	23,5	28,4	699,3	428,6	0,61
9		46,8	59,2	12,4	53,0	24,2	29,6	702,5	363,0	0,52
10		48,4	61,4	12,6	54,7	24,6	28,8	732,9	359,1	0,49
11		64,0	74,1	10,1	69,1	24,6	28,4	711,3	283,0	0,40
12		64,0	74,1	10,1	69,1	23,5	27,9	711,3	279,4	0,39
13		70,4	77,9	7,5	74,2	24,6	34,2	711,3	254,3	0,34
14		69,6	78,4	8,8	74,4	24,6	27,3	711,3	238,2	0,33
15		18,5	37,2	18,7	27,8	22,0	29,1	704,1	538,6	0,76

Таблица 2. Относительные погрешности расчётных КПД относительно результатов испытаний, %

Режимы испытаний	η испытания	Уравнение (3)		Уравнение (5)		Уравнение (8)	
		η	отн. погр.	η	отн. погр.	η	отн. погр.
1	0,55	0,571	±3,7 %	0,475	±14,6 %	0,61	±10,3 %
2	0,56	0,57	±1,8%	0,474	±16,6%	0,61	±8,5%
3	0,57	0,572	±0,4%	0,475	±18,18%	0,61	±6,8%
4	0,46	0,455	±1,1%	0,375	±20,4%	0,526	±13,4%
5	0,69	0,716	±3,7%	0,597	±14,5%	0,7	±1,4%
6	0,73	0,729	±0,1%	0,605	±18,7%	0,708	±3,1%
7	0,63	0,634	±0,6%	0,526	±18%	0,649	±3%
8	0,61	0,632	±3,5%	0,526	±14,8%	0,653	±6,8%
9	0,52	0,518	±0,4%	0,429	±19,2%	0,575	±10%
10	0,49	0,515	±5%	0,427	±13,7%	0,562	±13,7%
11	0,40	0,376	±6,2%	0,309	±18,9%	0,474	±17%
12	0,39	0,375	±3,9%	0,308	±23,5%	0,473	±19,2%
13	0,34	0,327	±3,9%	0,268	±23,7%	0,447	±27,2%
14	0,33	0,326	±1,2%	0,269	±20,4%	0,443	±29,2%
15	0,76	0,733	±3,6%	0,604	±22,9%	0,714	±6,2%

Испытания позволили уточнить θ . Затем по параметрам 15-ти режимов испытаний из таблицы 1 были определены расчётные КПД по уравнениям (3), (5), (8) в диапазоне температур на выходе от 37,8°С до 78,4°С, а также их относительные погрешности применительно к данным испытаниям (таблица 2).

Из таблицы следует, что в уравнении (5) относительная погрешность расчётного КПД, в сравнении с КПД по испытаниям, составляет от ±13,7% до ±23,7%. По уравнению (8) относительная погрешность расчётного КПД, по сравнению с данными испытаниями при $t_2 \leq 50^\circ\text{C}$, не превышает

±3%. По остальным режимам, в которых $t_2 > 50^\circ\text{C}$, от ±6,8% до ±29,2%. По уравнению (3) относительная погрешность составляет от ±0,1% до ±3,9% и один режим ±6,2%. Таким образом, уравнение (3) можно принять за "эталонное" при расчёте локальных КПД СК.

Принимая во внимание, что в уравнении (5) $F' = \text{const} = 0,8$ и, как известно, F' и U_L взаимосвязаны, в уравнение (5') вместо коэффициента 0,8 введён параметр F' , т.е.

$$\eta = F' \left[\theta - \frac{U_L(t_{\text{жс}} - t_a)}{\sum g_i} \right] \quad (5')$$

U_L рассчитывалось по уравнению:

$$U_L = U_i + U_b, \quad (13)$$

где U_b – коэффициент потерь через нижнюю поверхность коллектора, Вт/(м²·К), который определяется выражением:

$$U_b = \frac{k_{из}}{h_{из}}, \quad (14)$$

где $k_{из}$ – коэффициент теплопроводности изоляции, Вт/(м·К); $h_{из}$ – толщина изоляции, м.

U_i – коэффициент потерь через верхнюю поверхность коллектора третьего каскада, который определяется уравнением [2]:

$$U_i = \left(\frac{1}{h_{p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_{\omega} + h_{r,c-s}} \right)^{-1}, \quad (15)$$

где h_{p-c} – коэффициент конвективного теплообмена между пластиной и стеклом, определяется уравнением [2]:

$$h_{p-c} = \left[1 - 0,0018(\bar{T} - 10) \right] \cdot \frac{1,14\Delta T^{0,31}}{l^{0,07}}, \quad (16)$$

где \bar{T} – средняя температура между пластинами, °С; ΔT – разница температур между средней температурой пластины и стекла, °С; l – расстояние между пластинами, см; $h_{r,p-c}$ – коэффициент теплопередачи излучением от пластины к стеклу, определяется в соответствии с уравнением:

$$h_{r,p-c} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_c^2)(T_p + T_c)}{(1/\varepsilon_p) + (1/\tau) - 1}, \quad (17)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/м²·К; T_c, T_p – температура стекла и пластины соответственно, К; ε_p – степень черноты пластины; τ – пропускательная способность стекла.

h_{ω} – коэффициент конвективной теплоотдачи в ОС:

$$h_{\omega} = 5,7 + 3,8 U_0, \quad (18)$$

где U_0 – скорость ветра, м/с. Расчёт выполнен при $U_0 = 0$ м/с.

$h_{r,c-s}$ – коэффициент теплопередачи излучением от стекла к ОС, определяется уравнением:

$$h_{r,c-s} = \varepsilon_c \sigma (T_c + T_s^2)(T_c + T_s), \quad (19)$$

где T_s – температура воздуха, К.

T_c определяется методом итераций, используя следующее выражение [2]:

$$T_c = T_p - \frac{U_i(T_p + T_a)}{h_{p-c} + h_{r,p-c}}. \quad (20)$$

Расчётные локальные КПД по уравнениям (3) и (5'), а также их относительные погрешности применительно к данным испытаний представлены в таблице 3. При этом для режимов, в которых $t_{max} > 50^\circ\text{C}$ и $t_{ax} > t_a$, учитывая логарифмическое изменение температуры жидкости, она определялась по уравнению:

$$\Delta t = (t_2 - t_a) \cdot \left(\exp \frac{F'U_L}{Gc_p} \right). \quad (21)$$

При расчёте системы солнечного ГВС в отопительный период используются среднедневная интенсивность падающей солнечной радиации расчётного месяца в плоскости коллектора, среднедневная температура воздуха расчётного месяца, среднедневные тепловые потери.

На основании анализа результатов относительной погрешности расчётных КПД с данными, определёнными при испытаниях, в качестве "эталонного" уравнения для расчёта системы ГВС принята формула (5').

Применительно к климатическим условиям Севастополя по уравнениям (2), (3), (8) были рассчитаны дневные КПД для третьего каскада по месяцам для СК "пластина" с одним слоем прозрачной изоляции, поверхностью 1 м² и параметрами: $U_L = 2$ Вт/(м²·К), $U_L = 4,3$ Вт/(м²·К) и $U_L = 8$ Вт/(м²·К); θ – приведенная оптическая характеристика (принята для реального коллектора 0,809). Предварительные проработки показали, что оптимальная температура на входе в третий каскад в период с апреля по октябрь составляет 31°С [6]. Температура на выходе $t_2 = 50^\circ\text{C}$. Расход теплоносителя принят 10 кг/(м²·ч).

Полученные значения КПД представлены графически (рис. 3).

Таблица 3. Относительные погрешности расчётных КПД относительно результатов испытаний по уравнениям (3) и (5')

Режимы испытаний	η испытания	Уравнение (3)		Уравнение (5')	
		η	отн. погр.	η	отн. погр.
1	0,55	0,571	$\pm 3,7\%$	0,565	$\pm 2,7\%$
2	0,56	0,57	$\pm 1,8\%$	0,565	$\pm 0,8\%$
3	0,57	0,572	$\pm 0,4\%$	0,565	$\pm 0,9\%$
4	0,46	0,455	$\pm 1,1\%$	0,447	$\pm 2,9\%$
5	0,69	0,716	$\pm 3,7\%$	0,709	$\pm 2,7\%$
6	0,73	0,729	$\pm 0,1\%$	0,719	$\pm 1,5\%$
7	0,63	0,634	$\pm 0,6\%$	0,626	$\pm 0,6\%$
8	0,61	0,632	$\pm 3,5\%$	0,627	$\pm 2,7\%$
9	0,52	0,518	$\pm 0,4\%$	0,511	$\pm 1,7\%$
10	0,49	0,515	$\pm 5\%$	0,511	$\pm 3,6\%$
11	0,40	0,376	$\pm 6,2\%$	0,368	$\pm 0,5\%$
12	0,39	0,375	$\pm 3,9\%$	0,367	$\pm 2,5\%$
13	0,34	0,327	$\pm 3,9\%$	0,32	$\pm 3,7\%$
14	0,33	0,326	$\pm 1,2\%$	0,317	$\pm 1,2\%$
15	0,76	0,733	$\pm 3,6\%$	0,721	$\pm 5,3\%$

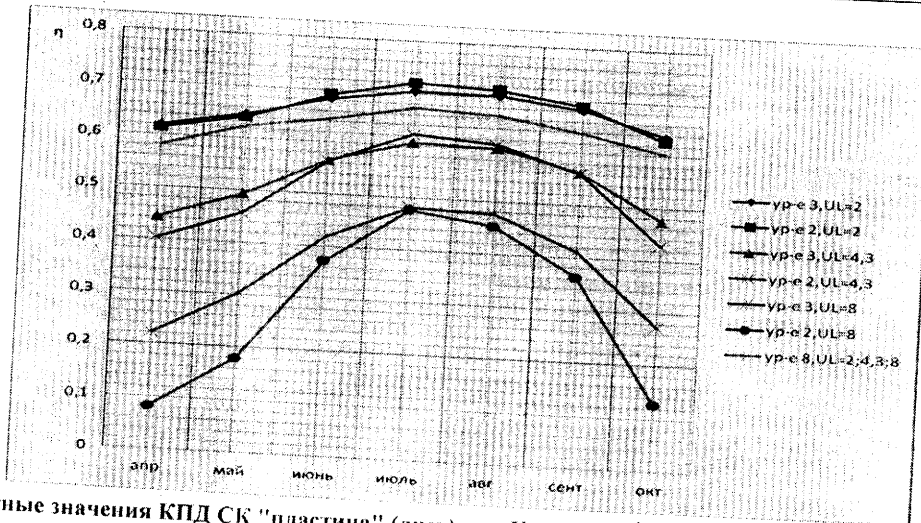


Рис. 3. Расчётные значения КПД СК "пластина" (лист) для $U_L = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $U_L = 4,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $U_L = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

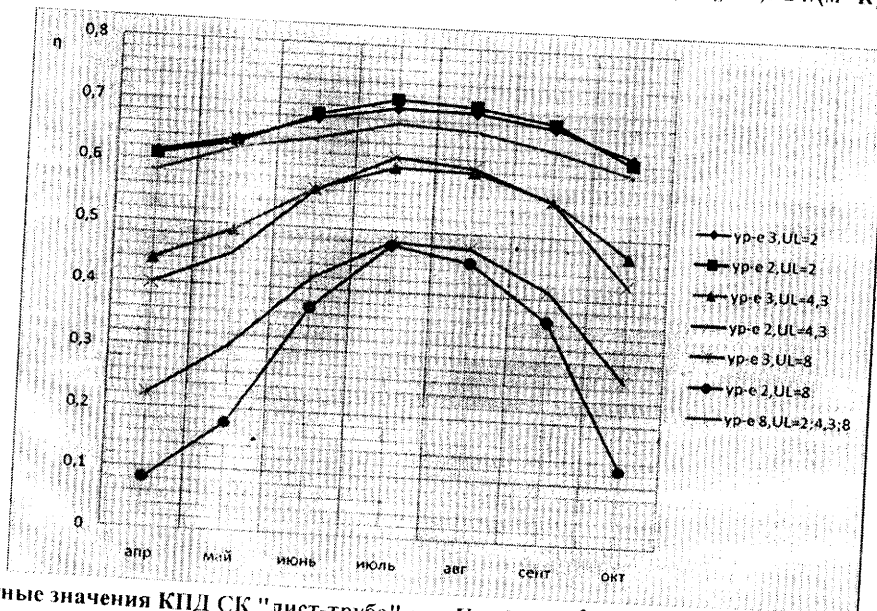


Рис. 4. Расчётные значения КПД СК "лист-труба" для $U_L = 2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $U_L = 4,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $U_L = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

На рис. 4 представлены КПД СК "лист-труба" из алюминиевого материала по формулам (2), (3), (8) применительно к климатическим условиям г. Севастополя. При этом оптические параметры остались прежними. Для СК, изготовленного как "лист-труба" введены параметры реального коллектора: W – расстояние между трубами ($W = 0,1$ м); эффективность ребра $F = 0,989$; $D_{\text{аутер}} = 0,012$ м; $D_{\text{инер}} = 0,014$ м; толщина ребра $0,001$ м. Для этих условий при расчёте КПД по (3) уточнялись параметры F' и F_R по уравнениям (4), (7).

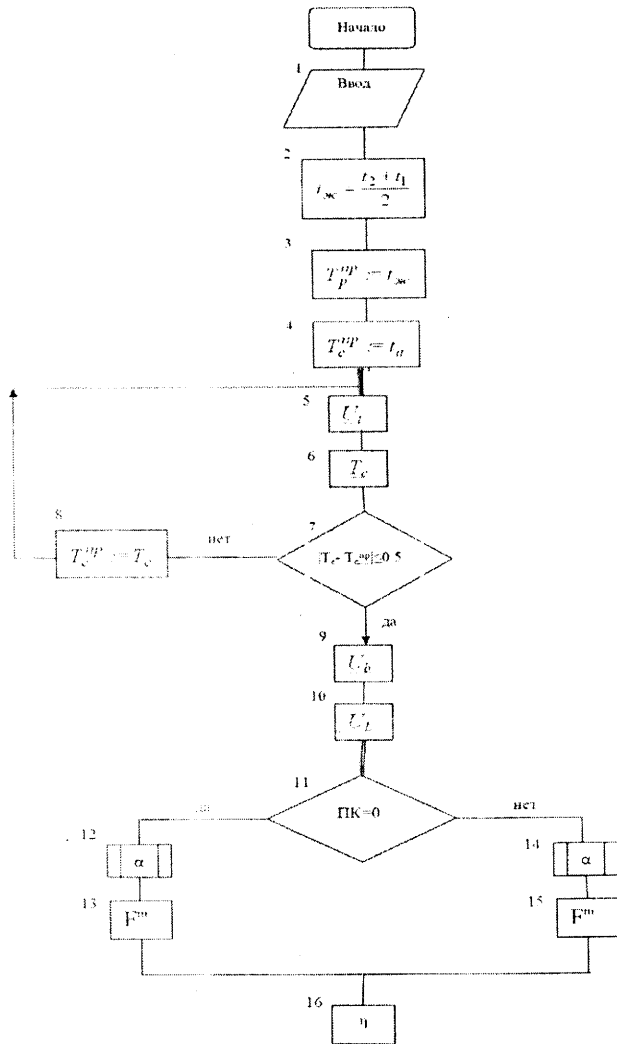


Рис. 5. Алгоритм расчёта КПД третьего каскада в системе солнечного ГВС.

Блок 1: "Ввод": ввод конструктивных и оптических параметров СК третьего каскада; физические свойства нагреваемой жидкости; физические параметры воздуха; суммарные дневные значения уровней солнечной радиации по месяцам по статистическим данным региона с учётом расположения СК; физические параметры материалов СК; режимы расхода теплоносителя через СК и их температуры.

Блок 5: расчёт U_i по формулам (15)–(19). Блок 6: расчёт T_c по формуле (20). Блок 9: расчёт U_b по формуле (14). Блок 10: расчёт U_l по формуле (13). Блок 11: $PK=0$ – СК "пластина";

$PK \neq 0$ – СК "лист-труба". Блок 12, 14: расчёт α по формуле:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_{\text{вн}}}; Nu = 0,33 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}. \text{ Блок 13: расчёт } F''' \text{ по}$$

формуле (6). Блок 15: расчёт F''' по формуле (7).

Блок 16: расчёт КПД по формуле (2).

Расчётные значения относительной погрешности уравнений (3) и (8) относительно уравнения (2) при $U_i > 2$ Вт/(м²·К) превышают пятипроцентный барьер. Расчёты показали, что при $t_2 > 50^\circ\text{C}$ относительная погрешность этих уравнений существенно возрастает.

Из рис. 3 и 4 следует, что расчётные значения среднедневных КПД по месяцам в (8) не зависят от конструкции СК (F') и количественных значений потерь в окружающую среду (U_i). Формула (8) не может быть принята для расчётов систем солнечного ГВС на основе СК различной конструкции. Значения КПД по (3) можно рассчитывать при $U_i \leq 2$ Вт/(м²·К). Графики на рис. 3 и 4 показывают, что СК с параметрами $U_i = 8$ Вт/(м²·К) неприемлемы для третьего каскада. Для вычисления КПД третьего каскада в системе солнечного ГВС в неотапливаемый период следует пользоваться уравнением (2), алгоритм расчёта которого представлен на рис. 5.

Для уточнения расчётов КПД в системе солнечного теплоснабжения второго и первого каскада ведутся теплотехнические испытания солнечного коллектора без прозрачной и тыльной изоляции.

Выводы. Уточнены уравнения для расчёта КПД СК с прозрачной и тыльной изоляцией в трёхкаскадной системе солнечного теплоснабжения в неотапливаемый период. Установлено, что в СК третьего каскада параметр U_i не должен превышать 4,3 Вт/(м²·К).

1. Макаров В.В., Горбатов О.И., Сперанская Ю.Ю. К вопросу создания каскадных гелиоустановок // *Відновлювана енергетика*. – 2010. – №4. – С. 23–27.

2. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж.А.Даффи, У.А.Бекман; под ред. Вишнякова В. – М.: Мир, 1977. – 420 с.

3. Установки солнечного горячего водоснабжения. Нормы проектирования. ВСН 52-86/ Госгражданстрой. – М.: Стройиздат. – 1988.

4. Горбатов О.И., Макаров В.В. Оценка конструктивной эффективности и КПД солнечных коллекторов 1-го каскада в составе трёхкаскадной гелиоустановки // *Відновлювана енергетика*. – 2011. – №4. – С. 27–32.

5. Герикович В.Ф. Солнечные установки горячего водоснабжения // *Відновлювана енергетика*. – 2008. – №1. – С. 11–24.

6. Макаров В.В., Горбатов О.И., Сперанская Ю.Ю. Технико-экономическая оценка однокаскадных и трёхкаскадных гелиоустановок для сезонного // *Збірник наукових праць СНУЧЕтаП*. – Севастополь: СНУЧЕтаП, 2010. – Вип. 4(36). – С. 269–275.