

## EFFICIENCY OF MULTI-MODULE SOLAR COLLECTORS AS A PREFIX TO A BOILER

**Denysova A.E., Mazurenko A.S., Denysova A.S.**  
*Odessa National Polytechnic University, Ukraine*

**Abstract.** Influencing factors on thermal and economic efficiency of the combined of heat supply installation are established. Constructive circuits of solar heat supply "prefix" interaction with boiler installation are worked out. Mathematical models of heat exchange processes in elements of combined heat supply system with the account solar engineering characteristics are developed. The techniques of analysis of efficiency of multi-modular system of solar collectors with compulsory circulation for water heating boiler allowing calculating of efficiency factor; heat removal factor and heat transfer factor with the account of construction and operation conditions of alternative heat supply system are presented.

**Keywords:** Solar collector, efficiency, compulsory circulation.

### EFICIENȚA MODULELOR DE COLECTOARE SOLARE CA STRUCTURI ADIȚIONALE A CENTRALELOR TERMICE PENTRU ÎNCĂLZIREA APEI

**Denisova A.E., Mazurenko A.S., Denisova A.S.**  
*Universitatea Națională Politehnică din Odesa, Ucraina*

**Rezumat.** S-au stabilit factorii, care au influență asupra indicilor de eficiență la producerea energiei termice și eficienței economice pentru instalațiile de producere combinată a căldurii pentru sistemele de încălzire. S-au elaborat soluții constructive și scheme de racordare sistemului cu colectoare solare la schema funcțională a centralei termice. S-a elaborat modelul matematic a proceselor de schimb de căldură în componentele sistemului, ținând cont de condițiile helio din regiunea de exploatare a colectoarelor solare. Se prezintă metoda de calcul a eficienței sistemului modular de colectoare solare, care prezintă un subsistem adițional racordat la cazanul de producere a apei calde. Metoda permite calcularea coeficientului eficienței termice, coeficientului de absorbire a căldurii, coeficientului de transfer termic, luând în considerare particularitățile de realizare constructivă și a condițiilor de exploatare a sistemului complex de alimentare cu căldură. Metoda elaborată permite de a stabili valorile optime a debitului agentului termic, ținând cont de schema de conexiune a colectoarelor și particularităților lor de realizare constructivă.

**Cuvinte-cheie:** Colectorul solar, eficiența, circulație forțată.

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОГОМОДУЛЬНЫХ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ-ПРИСТАВОК К ВОДОГРЕЙНЫМ КОТЛАМ

**Денисова А.Е., Мазуренко А.С., Денисова А.С.**  
*Одесский национальный политехнический университет*

**Аннотация.** Установлены факторы, влияющие на тепловую и экономическую эффективность комбинированной установки альтернативного теплоснабжения. Разработаны конструктивные схемы обеспечения взаимодействия солнечной "приставки" с котельной установкой. Разработана математическая модель процесса теплообмена в элементах системы с учетом гелиотехнических возможностей региона эксплуатации. Представлена методика расчета эффективности многомодульной системы солнечных коллекторов, являющихся приставкой к водогрейному котлу, которая позволяет рассчитать коэффициент тепловой эффективности, коэффициент отвода тепла и коэффициент теплоотдачи с учетом конструктивных и эксплуатационных условий работы многомодульной системы альтернативного теплоснабжения. Разработанная методика позволяет установить оптимальные значения массового расхода теплоносителя с учетом схемных решений и конструктивных особенностей солнечных коллекторов.

**Ключевые слова:** Солнечный коллектор, эффективность, принудительная циркуляция.

**Введение.**

При оценке эффективности использования солнечного коллектора (СК) обычно рассматривают параметры, зависящие от климатических условий и конструктивных характеристик. При этом характер и степень влияния перечисленных факторов на эффективность СК обычно определяется для условий естественной циркуляцией теплоносителя в СК [1].

При работе солнечных коллекторов как приставок к водогрейным котлам необходимы дополнительные данные об эффективности СК, поскольку циркуляция теплоносителя является принудительной.

**1. Методика расчета солнечных коллекторов**

Нами предлагается методика расчета многомодульной системы СК, выполняющих роль приставки к водогрейным котлам.

Баланс энергии СК:

$$H_c \cdot A_c (\alpha \tau) = Q_u + Q_{nom}, \quad (1)$$

где  $H_c$  – плотность потока солнечного излучения, поступающего на адсорбер, Вт/м<sup>2</sup>;

$A_c$  – площадь пластины адсорбера, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – пропускательная способность стеклянного покрытия;

$\alpha$  – поглощательная способность пластины адсорбера;

$Q_u$  – тепловой поток, передаваемый от адсорбера к жидкости, Вт;

$Q_{nom}$  – тепловой поток от пластины адсорбера в окружающую среду, Вт.

Тепловой поток, передаваемый от пластины адсорбера к жидкости  $Q_u$ , определяющий теплопроизводительность СК :

$$Q_u = m \cdot c_p (T_2 - T_1), \quad (2)$$

где  $m$  – массовый расход теплоносителя СК, кг/с;

$c_p$  – удельная теплоемкость среды, кДж/(кг · К);

$T_1, T_2$  – температура жидкости на входе и выходе СК, соответственно, К.

Тепловой поток  $Q_{nom}$ , определяющий тепловые потери СК:

$$Q_{nom} = K \cdot A_c (T_c - T_a), \quad (3)$$

где  $K$  – суммарный коэффициент тепловых потерь СК;

$T_c$  – средняя температура поглощающей пластины СК, К;

$T_a$  – температура окружающего воздуха, К.

Тепловой поток, передаваемый вдоль пластины, источником которого является солнечное излучение, поступающее на единицу длины трубы абсорбера [2]

$$q_u = [d + (W/2) \cdot F] \cdot [(\alpha \cdot \tau)] \cdot H_c - K(T_B - T_a), \quad (4)$$

где  $F = th[p(W-d)/2]/[p(W-d) \cdot 2]$  – эффективность оребрения;

$W$  – расстояние между трубами, м;

$d$  – внутренний диаметр трубок, м;

$T_B$  – температура рабочего тела, К.

$p$  – параметр, используемый для оценки эффективности оребрения поглощающей пластины СК

$$p = (2 \cdot \alpha_B / \lambda \cdot \delta)^{0.5}, \quad (5)$$

где  $\alpha_6$  – коэффициент теплоотдачи от абсорбера к жидкости в трубках, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\lambda$  – теплопроводность материала пластины, Вт/(м·К);

$\delta$  – толщина поглощающей пластины, м.

Тепловой поток  $q_u$  отводится водой, циркулирующей в трубке при температуре  $T_f$

$$Q_u = \pi \cdot d \cdot \alpha_B (T_B - T_f), \quad (6)$$

Переходя ко всей поверхности абсорбера, с учетом формул (1–5) следует, что полный полезный тепловой поток [3] равен

$$Q_u = A_c \cdot F_R \cdot [(\alpha \cdot \tau) \cdot H_c - K(T_B - T_a)], \quad (7)$$

где  $F_R$  – коэффициент отвода тепла из СК, который можно определить по формуле

$$F_R = (m \cdot c_p / K \cdot A_c) / \{1 - \exp[-A_c \cdot K \cdot F' / (m \cdot c_p)]\}. \quad (8)$$

Коэффициент отвода тепла  $F_R$  равен [2]

$$F_R = G \cdot c_p (T_2 - T_1) / [H_c (\alpha \cdot \tau) - K(T_1 - T_a)], \quad (9)$$

где  $G = m/A_c$  – расход воды на единицу площади СК, кг/(с·м<sup>2</sup>).

Коэффициент эффективности коллектора

$$F' = (1/K) / \{W[(1/(K(d + (W - d)F))) + (1/(\pi \cdot d \cdot \alpha_B))]\}, \quad (10)$$

При этом уравнение (10) учитывает отношение термического сопротивления между СК и окружающей средой к термическому сопротивлению в процессе теплообмена между теплоносителем и окружающей средой.

Следует отметить, что коэффициент теплоотдачи  $\alpha_B$  от внутренней поверхности трубы к жидкости может изменяться в широких пределах 100 – 5000 Вт/(м<sup>2</sup>·К), что определяется режима движения и геометрией проходного сечения канала.

При расчете СК для систем горячего водоснабжения с естественной циркуляцией, обычно задаются температурой подогрева воды, а КПД определяют графическим путем [1] с учетом средней температуры поглощающей пластины  $T_c$  и температуры окружающей среды  $T_a$  с учетом количества прозрачных покрытий коллектора. При этом расход и скорость теплоносителя определяются по эмпирическим данным, с учетом температурного напора  $\Delta T = (T_2 - T_1)$ , взаимного расположения СК и бака-аккумулятора, поэтому оценить точно скорость циркуляции теплоносителя по трубкам

СК нельзя.

Если для замещения части тепловой нагрузки используется многомодульная система СК, работающих совместно с водогрейным котлом, требуемая потребителем температура теплоносителя гарантируется котлом в, а солнечные коллектора исполняют роль водяного экономайзера с принудительной циркуляцией, обеспечивая предварительный подогрева воды для котла. Существующая методика для расчета СК с естественной циркуляцией ответа на этот вопрос не дает.

Для исследования изменения коэффициента эффективности СК  $F'$  от коэффициента теплоотдачи  $\alpha_v$ , необходимо предварительно установить зависимость коэффициента теплоотдачи от режима движения жидкости в трубах.

Для вынужденного турбулентного режима течения жидкости в трубах интенсивность теплообмена можно определить по формуле [4]

$$Nu_{жс} = 0,021 \cdot Re_{жс}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot (Pr_{жс} / Pr_c)^{0,25}, \quad (11)$$

где  $Re_{жс} = V \cdot d / \nu$ ;

$V$  – скорость движения воды в трубах, м/с;

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с;

$Pr$  – число Прандтля.

Уравнение (11) определяет среднюю теплоотдачу в прямых гладких трубах при  $(l/d) > 50$ . За определяющую температуру принимается средняя температура жидкости  $T_{ср} = (T_1 + T_2) / 2$ , определяющим размером является внутренний диаметр трубы  $d$ . Число  $Pr_c$  выбирается по средней температуре поверхности стенки трубы.

Для вынужденного ламинарного движения жидкости в трубах зависимость интенсивности теплообмена от режима течения можно определить по формуле [4]

- при вязкостном режиме (число Рэлея  $Ra = Gr \cdot Pr \leq 8 \cdot 10^5$ );

$$Nu_{жс} = 1,55 \cdot (Re_{жс} \cdot Pr_{жс} \cdot d / l)^{1/3} (\mu_{жс} / \mu_c)^{1/7}, \quad (12)$$

- при вязкостно-гравитационном режиме (при  $Ra = Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5$ );

$$Nu_{жс} = 0,15 \cdot Re_{жс}^{0,33} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot Gr_{жс}^{0,33} (Pr_{жс} / Pr_c)^{0,25}, \quad (13)$$

что позволяет определить коэффициент теплоотдачи от абсорбера к жидкости в трубках  $\alpha_B = Nu \cdot \lambda / d$ .

На рис. 1 представлены расчетные схемы циркуляции жидкости для трех наиболее типичных вариантов соединения модулей СК при одинаковом суммарном расходе теплоносителя  $\Sigma G$  (м<sup>3</sup>/с), но при различном удельном расходе  $G = \Sigma G / A_c$ , м<sup>3</sup>/(с·м<sup>2</sup>). Количество труб в одном модуле СК принимается равным 6, длина труб  $l = 1$  м, внутренний диаметр  $d = 0,01$  м, расстояние между трубами  $W = 0,15$  м, коэффициент эффективности ребра  $F = 0,94$ , рабочее тело – вода.

## 2. Результаты расчета солнечных коллекторов

Результаты расчета тепловой эффективности СК по предлагаемой нами методике для разных вариантов соединения модулей коллекторов (рис. 1) при изменении суммарного расхода воды ( $\Sigma G = \Sigma G / A_c = 0,01 \cdot 10^{-3}$ ,  $0,04 \cdot 10^{-3}$ ,  $0,16 \cdot 10^{-3}$ ,  $0,64 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с)

позволяют проанализировать эффективность СК в широком диапазоне скоростей циркуляции в его трубках.

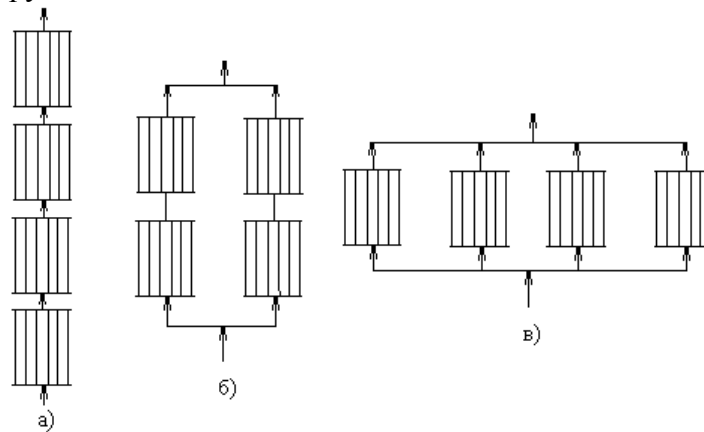


Рис. 1. Расчетные схемы циркуляции для 3-х вариантов соединения СК

На рис. 2 представлены результаты расчета коэффициентов тепловой эффективности  $F'$  и отвода теплоты  $F_R$  при изменении режима течения, определяемого удельным расходом жидкости  $G$  и конструктивными параметрами модуля СК для трех вариантов компоновки модулей. За начало отсчета по скорости потока принято  $V=4 \cdot G / (\pi \cdot d \cdot n) = 0,01$  м/с, которое соответствует удельному расходу жидкости  $G=18 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/(с·м<sup>2</sup>), число трубок одного модуля – 6 шт.

Для аналогичных условий представлены графики (рис. 3) изменения коэффициента теплоотдачи  $\alpha_v$  от внутренней поверхности трубы абсорбера к теплоносителю и изменение соответствующего температурного напора  $\Delta T$ .

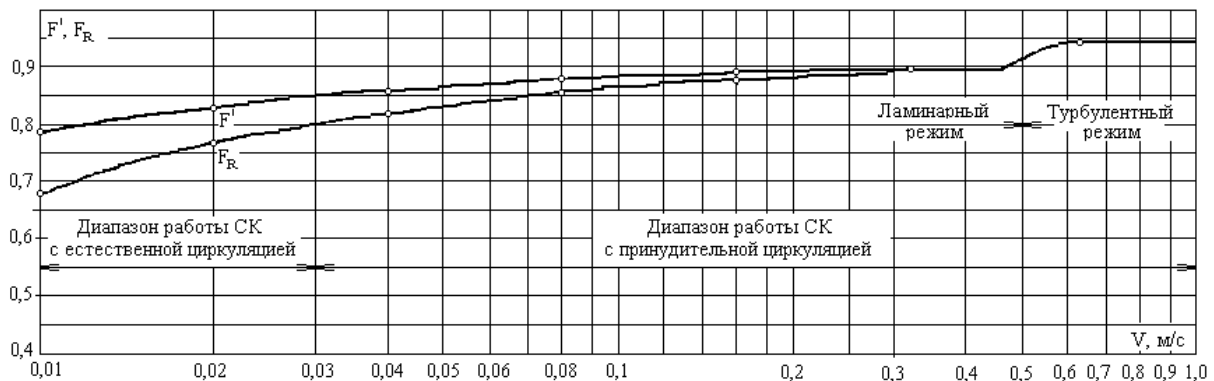


Рис. 2. Зависимость коэффициентов эффективности  $F'$  и отвода тепла  $F_R$  от скорости циркуляции воды в трубках СК при  $d = 0,01$  м и  $T_{cp} = 40$  °С

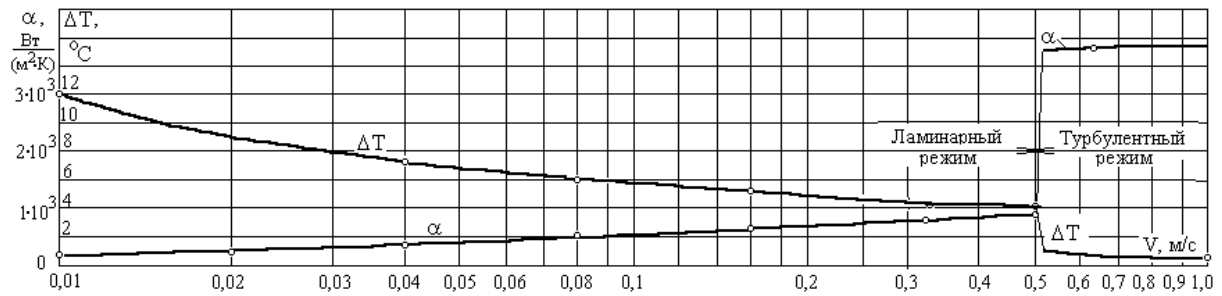
### 3. Анализ результатов расчета

Анализ результатов расчета показывает, что для СК с естественной циркуляцией теплоносителя, работающих при скорости циркуляции в трубках  $V=0,01...0,03$  м/с коэффициент эффективности соответствует диапазону значений  $F'=0,8...0,85$ , а коэффициент отвода тепла соответствует диапазону  $F_R=0,68...0,8$ . При этом коэффициент теплоотдачи  $\alpha_v=200...300$  Вт/(м<sup>2</sup>·К), а температурный напор  $\Delta T=8...12$  °С. Поэтому, для СК с естественной циркуляцией теплоносителя КПД, зависит от разности

температур  $\Delta T$  между окружающей средой и жидкостью на входе и коэффициента отвода тепла  $F_R$  [5, 6]

$$\eta_{СК} = F_R(\alpha \cdot \tau) \cdot [1 - K(T_B - T_A) / H_c(\alpha \cdot \tau)].$$

При умножении на коэффициент отвода тепла  $F_R$  КПД снижается на ~30 %, а температура воды на выходе из СК отстает от температуры абсорбера на 10 °С и более, чем объясняется низкая тепловая эффективность СК с естественной циркуляцией [7].



**Рис. 3.** Зависимость коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  и температурного напора  $\Delta T$  от скорости циркуляции воды в трубах СК при  $d = 0,01$  м и  $T_{cp} = 40$  °С

Принудительная циркуляция воды в СК позволяет увеличить коэффициент эффективности до  $F' = 0,95$ , при этом коэффициент отвода тепла также увеличивается до  $F_R = 0,95$ , а температура нагреваемой воды приближается к температуре поверхности абсорбера при температурном напоре  $\Delta T = 1$  °С, что существенно улучшает тепловую эффективность коллектора [8].

Предлагаемая методика позволяет рассчитать коэффициент теплоотдачи от поверхности труб к циркулирующему в них теплоносителю, и определить эффективность многомодульной системы СК, выполняющей роль приставки к котлу [9].

### Выводы.

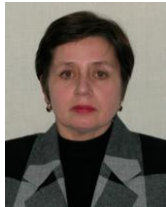
Предлагаемая методика расчета тепловой эффективности солнечных коллекторов позволяет определять величину коэффициента теплоотдачи между внутренней стенкой трубы поглощающей пластины солнечного коллектора и водой, циркулирующей в трубках при естественной и принудительной циркуляции, а также температуру поглощающей пластины, которая оказывает существенное влияние на суммарный коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора.

Анализ результатов расчета показывает, что коэффициент эффективности для солнечных коллекторов с естественной циркуляцией теплоносителя соответствует диапазону  $F' = 0,8 - 0,85$ , а коэффициент отвода тепла лежит в интервале  $F_R = 0,68 - 0,8$ . При этом температура воды на выходе из солнечного коллектора меньше, чем температура поглощающей пластины на 10°С, что приводит к низкой тепловой эффективности солнечных приставок к котлу. Применение принудительной циркуляции теплоносителя в солнечных приставках к котлу позволяет увеличить коэффициент эффективности до  $F' = 0,95$ , при этом коэффициент отвода тепла увеличивается до  $F_R = 0,95$ , а температура нагреваемой воды приближается к температуре поверхности поглощающей пластины, что положительно сказывается на тепловой эффективности системы альтернативного теплоснабжения.

## Литература

- [1] Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
- [2] Даффи Дж. А., Бекман У. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М.: Мир, 1977. – 420 с.
- [3] Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983. – 512 с.
- [4] Теплообменные аппараты холодильных установок / Г.Н. Данилова, С.Н.Баданов, О.П. Иванов и др. – Л.: Машиностроение, 1986. – 303 с.
- [5] Валов М.И., Б.И.Казанджан. Системы солнечного теплоснабжения. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 140 с.
- [6] Денисова А.С., Новаковский Е.В., Мазур Е.Г. Энергетическая эффективность солнечных приставок к котлам комбинированных систем теплоснабжения // Труды Одесского политехнического университета. —2004. – Вып. 1(21). – с. 87 – 92.
- [7] Денисова А.Е., Мазуренко А.С. Комбинированные системы теплоснабжения на базе солнечных установок // Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2002. – № 6. – с. 14-19.
- [8] Денисова А.Е., Мазуренко А.С., Новаковский Е.В. Повышение эффективности комбинированных систем теплоснабжения с солнечными приставками.– 2003.– № 4 (84). – с. 33–37.
- [9] Denysova Alla, Mazurenko Anton. Prospects of use of the combined heat-supply systems at solar collectors //Zeszyty Naukowe Politechnika Opolska. Seria Elektryka, z. 51, N 280/2002, Vol.1.– pp. 141 –150.

### Об авторах.



**Денисова Алла Евсеевна.** Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой тепловых электрических станций и энергосберегающих технологий Одесского национального политехнического университета. Ее научные интересы включают генерация энергии с использованием возобновляемых источников энергии, интегрированные системы теплоснабжения.  
Email: [alladenysova@gmail.com](mailto:alladenysova@gmail.com)



**Мазуренко Антон Станиславович.** Доктор технических наук, профессор, кафедры тепловых электрических станций и энергосберегающих технологий Одесского национального политехнического университета. His research interests includes distributed power generation and microgrid.  
Email: [antmaz46@gmail.com](mailto:antmaz46@gmail.com)



**Денисова Анастасия Сергеевна.** Программист-бакалавр, кафедрой тепловых электрических станций и энергосберегающих технологий Одесского национального политехнического университета. Ее научные интересы включают энергосберегающие технологии и энергоменеджмент.  
Email: [didanzangelsita@gmail.com](mailto:didanzangelsita@gmail.com)