

## ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ УСТАНОВКИ

Селихов Ю.А., канд. техн. наук, доцент, Коцаренко В.А., канд. техн. наук, доцент,  
Горбунов К.А., канд. техн. наук, доцент, Давыдов В.А., аспирант

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков

*Исследованы различные типы солнечных установок и материалы, применяемые в них. Выбраны: вариант солнечной установки в качестве прототипа для оптимизации, интеграции и автоматизации; материалы, применяемые в новейших разработках солнечных установок и оборудование. Разработана новая технологическая схема в качестве проекта солнечной установки. По проекту построена установка в АР Крым. Были выполнены: теплотехнический расчет установки и расчет эксергетической эффективности применения новых материалов и оборудования. Это позволяет увеличить: температуру теплоносителя до 85-90 °С; КПД солнечной установки до 92 % по сравнению с прототипом - 67 %, при этом срок окупаемости установки соизмерим со сроком монтажа всей установки - около четырех месяцев.*

*The different classes of sun options and goods, applied in them are investigational. Chosen: variant of sun installation as a prototype for optimization, integration and automation; goods, applied in the newest developments of sun options and installation. A new flowsheet is designed as a device of sun installation. On a device installation is built in Crimea. Were executed: heating engineering calculation of installation and calculation of efficiency of application of new goods and installation. It allows to increase: temperature of fluids to 85-90 °С; Output-input ratio sun installation to 92 % as compared to a prototype - 67 %, thus equal the date of recoupment of installation with the date of assembly of all of installation - about four months.*

Ключевые слова: Эксергия, эксергия-нетто, коэффициент полезного действия, удельная плотность теплового потока, солнечный коллектор.

$q$  – удельная плотность теплового потока, Вт·ч/м<sup>2</sup>;

$A_C$  – площадь поверхности, м<sup>2</sup>;

$H$  – плотность потока солнечного излучения (прямого или рассеянного), падающего на единицу площади поверхности с произвольной ориентацией, Вт/м<sup>2</sup>;

$R$  – коэффициент перехода от плотности потока прямого или рассеянного излучения к плотности потока излучения в плоскости ориентации коллектора;

$Q_U$  – тепловой поток, переданный рабочей жидкости в солнечном коллекторе (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., Вт;

$Q_S$  – поток тепла, аккумулируемого коллектором, Вт;

$h$  – время работы установки в году, час.;

$h_a$  – время, когда установка не работает, час.;

$M_a$  – масса, кг;

$\mathcal{E}_a$  – удельная энергоемкость, МДж/кг;

$E$  – полный расход эксергии, МДж.

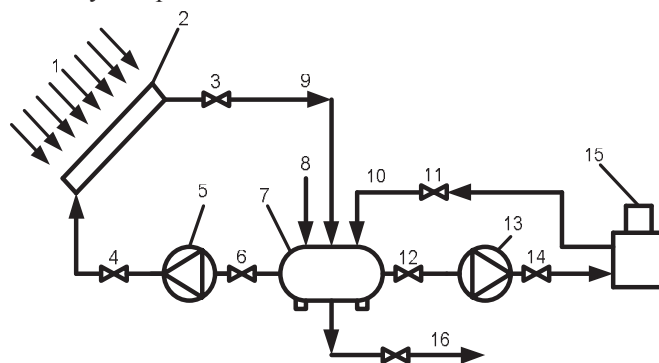
**Постановка проблемы.** Энергетический кризис, уменьшение запасов органичного топлива и его удорожание диктует необходимость использования альтернативных возобновляемых источников энергии. Солнечное излучение является основным источником возобновляемых ресурсов энергии на Земле. Вместе с тем солнечная энергия может восприниматься на земле в среднем не более 9 часов в сутки и с переменной эффективностью, что значительно затрудняет ее использование. Поэтому считается, что солнечной энергией может покрываться не более 3-5 % всей потребляемой энергии на Земле. Однако и такое использование солнечного излучения позволяет сэкономить многие сотни миллионов тонн органического топлива [1].

С интенсивным развитием технологий солнечной энергетики, появилось множество конструктивных решений и вариантов гелиосистем, которые классифицируются за разными критериями. Однако, солнечные установки, предлагаемые в Украине, иностранных и отечественных производителей дороги как при покупке, так и при эксплуатации. На наш взгляд, актуальной является концепция создания новых конструкций солнечных установок, наиболее привлекательных для потенциального потребителя. Реализация данной концепции возможна при таком варианте исполнения солнечных установок, когда затраты на

выработку тепловой энергии с помощью этих установок будут ниже уровня суммарных затрат на получение тепловой энергии традиционными способами (в частности, в котельных установках). Одновременно с этим срок окупаемости солнечных установок должен быть соизмерим с гарантийным сроком их эксплуатации. Для выполнения поставленных условий представляется целесообразной разработка таких конструкций солнечных установок, которые позволяли бы минимизировать затраты на их изготовление, монтаж, обслуживание и ремонт. Это может достигаться за счет использования дешевых отечественных материалов, выпуск которых гарантирован в достаточных объемах на протяжении длительного срока. Выше указанные задачи являются актуальными.

**Цель статьи.** В данной работе предлагается двухконтурная солнечная установка для горячего водоснабжения в летнее и осенне-весеннее периоды, а также для отопления зданий в холодное время года с круглосуточным компьютерным управлением. Для решения поставленных задач нами выполнен анализ технических возможностей различных типов уже работающих солнечных установок, изучены материалы, применяемые в этих установках. Выбран вариант солнечной установки в качестве прототипа для оптимизации, интеграции и автоматизации.

Прототипом [2] для дальнейшей оптимизации, интеграции и автоматизации работы выбираем двухконтурную солнечную установку, показанную на рис. 1.



1 – солнечное излучение; 2 – солнечный коллектор; 3, 4, 6, 11, 12, 14, 16 – регулировочные вентили;  
5, 13 – циркуляционный насос; 7 – накопительный бак; 8 – подача холодного теплоносителя;  
9, 10 – подача горячего теплоносителя; 15 – тепловой дублер; 16 – подача горячего теплоносителя к потребителю

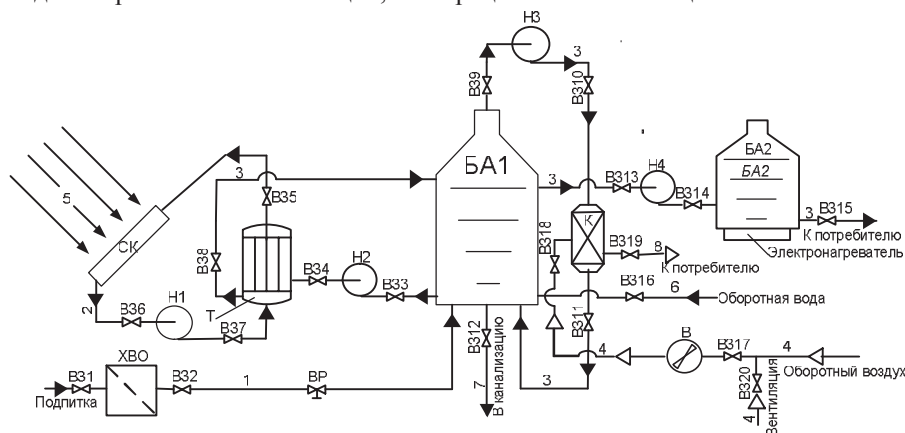
**Рис. 1 – Принципиальная схема солнечной установки для отопления зданий**

Были определены недостатки приведенной технологической схемы: в первом варианте работы система находится под давлением насоса, что в случае разгерметизации системы приведет к потере теплоносителя; отсутствует оборудование для химической подготовки теплоносителя перед подачей в солнечный коллектор; накопительный бак работает как накопительная емкость для холодного и горячего теплоносителей; работа установки осуществляется только в ручном режиме и зависит от обслуживающего персонала; отсутствует система автоматизации установки и связь ее с регулирующим органом; теплоноситель нагревается в солнечном коллекторе до температуры 63 °С; большая металлоемкость установки; очень плохое качество теплоносителя, используемого в установке; выпадение солей из теплоносителя при температурах выше 50 °С забивает проходные сечения в солнечных коллекторах, что снижает эффективность работы установки и ее долговечность. Для улучшения эффективности работы и удешевления установки необходимо: произвести оптимизацию конструкции двухконтурной солнечной установки, применив новое оборудование, материалы и систему автоматизации всех узлов установки; повысить коэффициент полезного действия (КПД) солнечной установки за счет применения новых материалов, теплоносителей и другого вспомогательного оборудования; усовершенствовать работу установки с помощью ЭВМ; уменьшить стоимость установки за счет снижения материалоемкости установки, применения новых материалов и оборудования; сделать подачу теплоносителя круглосуточной.

**Результаты.** Для решения этих задач мы провели литературный обзор и выбрали плоскокапиллярный тонкопленочный солнечный коллектор [3] безнапорного типа специальной конструкции из полимерной пленки, в котором теплоноситель движется сверху вниз под действием силы тяжести по наклонной поверхности в виде пленки жидкости.

Мы также пришли к выводу, чтобы эффективность работы коллектора не снижалась, необходимо провести замену старого оборудования новым [4]. На рис.2 представлена технологическая схема солнечной установки после ее оптимизации.

По разработанной схеме двухконтурная солнечная установка была изготовлена и смонтирована на крыше одного из пансионатов АР Крым. После всех замен получилась технологическая схема, для которой необходимо сделать расчет по оптимизации, интеграции и автоматизации.



1, 3, 6, 7 – холодный теплоноситель;  
2 – антифриз; 4,8 – воздух; 5- солнечное излучение

**Рис. 2 – Принципиальная технологическая схема двухконтурной солнечной установки для отопления помещений СК – солнечный коллектор; БА1, БА2 – баки-аккумуляторы; Н1, Н2, Н3, Н4 – циркуляционные насосы; ВР – вентиль регулировочный; В31÷В34 – вентили запорные; К – калорифер; В вентилятор; Т – теплообменник; ХВО – аппарат химводоочистки;**

Составив уравнения энергетического баланса (1) и сделав теплотехнические расчеты [3] прототипа и новой схемы солнечной установки получим температуры нагрева теплоносителя, удельные тепловые потоки и КПД как прототипа, так и новой солнечной установки. Эти данные представлены в таблице 1.

$$A_C \cdot \left\{ [H \cdot R \cdot (\tau \cdot a)]_b + [H \cdot R \cdot (\tau \cdot a)]_d \right\} = Q_U + Q_L + Q_S \quad (1)$$

Анализ экспериментальных данных показал, что замена прототипа новой солнечной установкой оказалась эффективной. Далее нами был произведен расчет КПД прототипа и новой солнечной установки при различных удельных тепловых потоках по результатам эксперимента. Эти результаты получены по зависимости (2) [3] и представлены в табл. 1

$$\eta = \frac{\int Q_U \cdot dt}{\int H \cdot R \cdot dt} \quad (2)$$

**Таблица 1**

$q$ , Вт·ч/м <sup>2</sup>	Прототип, $\eta$	Новая солн. установка, $\eta$
125	0,5	0,8
250	0,69	0,89
500	0,67	0,92
750	0,65	0,85

Срок окупаемости новой солнечной установки составил четыре месяца. Для проверки эффективности работы новой солнечной установки из многообразия методов, мы избрали эксергетический метод расчета [7]. Применяем методику оценки эффективности возобновляемых источников энергии (ВИЭ) по эксергии-нетто. Решение о пригодности или непригодности проекта ВИЭ к последующей проработке принимается в зависимости от знака неравенства  $\tau_{ок} \geq \tau_{норм}$  (здесь  $\tau_{норм}$  — нормативный срок), где срок энергетической окупаемости  $\tau_{ок}$  ВИЭ определяется приравниванием суммарных расходов первичной эксергии  $\tau$  по традиционному (a) и новому (b) вариантам.

$$\Pi = \sum M_a \cdot E_a + \frac{N}{\eta_a} \cdot \tau_{ок} = \sum M_b \cdot E_b + \frac{N}{\eta_b} \cdot \tau_{ок} \quad (3)$$

Срок окупаемости солнечной установки:

$$\tau_{ок} = \frac{\sum m_b \mathcal{E}_b - \sum m_a \mathcal{E}_a}{1/\eta_a - 1/\eta_b}, \quad (4)$$

где  $m_a = \frac{M_a}{N}$ ,  $m_b = \frac{M_b}{N}$  - удельные расходы эксергии в прототипе и новом вариантах соответственно;  $N$  - гарантированная мощность, которая отдается, одинаковая для обоих сравниваемых вариантов;  $\eta_a$ ,  $\eta_b$  - эксергетический КПД сравниваемых вариантов по использованию первичной эксергии.

Если ВИЭ дает гарантированную мощность без дополнительного подключения к традиционному источнику энергии, то текущих расходов первичной энергии нет и можно считать  $\eta_b = \infty$ . Тогда срок окупаемости может быть определен по формуле:

$$\tau_{ок} = \frac{\eta_a}{3600 \cdot h} (\sum m_b \mathcal{E}_b - \sum m_a \mathcal{E}_a) \quad (5)$$

КПД новой установки:

$$\eta_b = \frac{h}{h_a} \eta_a \quad (6)$$

В качестве примера, затраты эксергии на проектирование и изготовление прототипа и новой солнечной установки представлны в табл.2 и табл.3.

**Таблица 2 – Расходы эксергии на проектирование и изготовление прототипа**

Материал	Масса $M_a$ , кг	Удельная энерго-емкость $\mathcal{E}_a$ , МДж/кг	Полные расходы эксергии $E$ , МДж	$m_a$	$m_a \cdot \mathcal{E}_a$
Стекло 4 мм	224	27	6048	0,00747	0,2016
Швеллер №10	10470	60	628200	0,349	20,948
Металлический лист	240	60	14400	0,008	0,48
Изоляция, м <sup>2</sup>	48	114	5472	0,0016	0,1824
Вентили, 14 шт.	14	150	2520	0,000467	0,00653
Накопительный бак $V = 18 \text{ м}^3$	1500	60	90000	0,05	3
Насосы, 2 шт.	6	150	900	0,0002	0,03
Трубопроводы	–	–	803,84	–	–
Всего	–	–	748343,84	–	24,872
Всего с учетом расходов эксергии на обработку и сборку оборудования (коэффициент 1,2)	–	–	898012,608	–	–

Таблиця 3 – Расходы эксергии на проектирование и изготовление новой солнечной установки

Материал	Масса $M_a$ , кг	Удельная энерго-емкость $\Theta_a$ , МДж/кг	Полные расходы эксергии $E$ , МДж	$m_a$	$m_a \cdot \Theta_a$
Стекло 4мм	210	27	5670	0,00	0,189
Швеллер №18	14700	60	882000	0,49	29,4
Насосы, 4 шт	12	150	1800	0,00	0,06
Изоляция, м <sup>2</sup>	300	114	34200	0,01	1,14
Вентили, 35 шт	40	150	6000	0,00	0,2
Бак-аккумулятор $V = 18 \text{ м}^3$	1500	60	90000	0,05	3
Бак-аккумулятор $V = 9 \text{ м}^3$	750	60	45000	0,02	1,5
Электро-нагреватель	50	–	7500	0,00	0,25
Полимерное покрытие	120	120	14400	0,00	0,48
Теплообменник	1500	60	90000	0,05	3
Калорифер	1200	60	72000	0,04	2,4
Вентилятор	500	60	30000	0,01	1
ХВО	2000	60	120000	0,06	4
Трубопроводы	–	–	4019,2	–	–
Всего	–	–	1395089,225	–	46,619
Всего с учетом расходов эксергии на обработку и сборку оборудования (коэффициент 1,2)	–	–	1674107,07	–	–

Результаты расчетов за формулами (3) -(6) приведены в таблице 4.

Таблиця 4 – Результаты расчетов

$\eta_a$	$\eta_b$	$\tau_{ок}$ , мес.
0,67	0,92	4,0

Был произведен экономический и эксергетический расчеты срока окупаемости новой солнечной установки. Погрешность расчетов составила 5 %.

#### Выводы

Выполнен анализ технических возможностей различных типов солнечных установок, изучены материалы, применяемые в установках. Выбран вариант солнечной установки в качестве прототипа для оптимизации, интеграции и автоматизации. На основе литературного обзора материалов, применяемых в новейших разработках солнечных установок, выбраны новые материалы и оборудование. Составлена новая технологическая схема в качестве проекта солнечной установки. Показана эффективность применения новых материалов. Был выполнен расчет экономической и эксергетической эффективности применения новых материалов и оборудования. Установлено, что применение новых материалов и оборудования позволяет увеличить: температуру теплоносителя до 85-90 °С; КПД солнечной установки до 92 % по сравнению с прототипом - 67 %, при этом срок окупаемости установки соизмерим со сроком монтажа всей установки - около четырех месяцев.

### Литература

1. Мешалкин В.П., ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.А. Основы теории ресурсосберегающих химико-технологических систем. Учебное пособие.–Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 412 с.
2. Даффи Дж., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии.–М: Мир, 1977.– 420 с.
3. Селихов Ю.А., Селихова Л.Ю., Бухкало С.И. Полімерна композиція, Патент України, № 72078 А, Бюл. № 10, 2004.
4. Селихов Ю.А., Селихова Л.Ю., Селихова Н.В., Бухкало С.И. Двоконтурна геліоводонагрівна установка, Патент України, № 64198 А, Бюл. № 2, 2004.
5. Бекман У., Гилли П. Тепловое аккумуляирование энергии. М., Мир. 1987. – 470 с.
6. Мацевитый Ю.М., Ведь В.Е., Иванов В.А., Лушпенко С.Ф. Разработка безобжиговых теплоизолирующих материалов для высокотемпературных покрытий металлов: Доповіді Національної академії наук України: Сб. научн. тр. – №10.-Харьков:-1998. – С. 112 – 117.
7. Эксергетические расчеты технических систем: Справ. пособие/ Бродянский В.М. и др.: Под ред. Долинского А.А., Бродянского В.М. АН УССР. Ин-т технической теплофизики.- Киев: Наук. Думка, 1991. – 360 с.
8. Бабіченко А.К., Тошинський В.І., Михайлов В.С., Подустов М.О., Пугановський О.В. Промислові засоби автоматизації. Ч.1. Вимірвальні пристрої / За заг. ред. А.К. Бабіченка: Навчальний посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2001 р. – 470 с.

УДК 664.012.3.048.5 – 0.48.34

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ВВУ С ТЕПЛОМЫМ НАСОСОМ

Смирнов Г.Ф., д-р техн. наук, профессор, Зыков А.В., канд. техн. наук, доц.,  
Резниченко Д.Н., аспирант

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса

Приведено сравнение путей снижения затрат энергии при концентрировании растворов выпариванием. Произведена оценка эффективности применения испарительно-конденсационных систем трансформации энергии в сравнении с традиционными схемами с механической компрессией пара. Для промежуточного теплоносителя найдена температура испарения, обеспечивающая минимум удельных энергозатрат при заданных условиях.

The comparison of ways of vacuum evaporator energy saving is shown. The energy efficiency value of the evaporative-condensing thermal transformation systems is compared with the mechanical vapor compressing system one. The evaporative temperature setting up the minimum of specific energy consumption for specified conditions is found.

Ключевые слова: концентрирование, выпаривание, энергосбережение, тепловой насос, оптимизация.

Один из приемов в пищевых производствах заключается в организации выпаривания исходных растворов в вакууме. Особую важность имеют процессы, при которых лучше всего сохраняются органолептические и санитарно-гигиенические их качества. Исследования и разработка таких технологий получения продуктов соответствуют режимам обработки исходного сырья, при которых с одной стороны под влиянием температуры удается максимально дезинфицировать исходную массу, с другой стороны сохранить ее органолептические и санитарно-гигиенические качества. Эти противоречивые требования могут быть решены при организации процессов концентрирования в вакууме с кратковременным воздействием высоких температур и быстрым охлаждением. Такие требования технологии существенно усложняют инженерную реализацию, но, успешно решаются использованием выпаривания в вакуум-выпарных аппаратах и быстрым охлаждением природными средствами (ледяной водой или охлажденными газами). Последнее напрямую связано с применением средств холодильной техники. Это означает, что традиционные технологии, которые реализуют столь противоречивые требования, тяготеют к существенному росту использования энергии. Поэтому изучение эффективных путей снижения затрат энергии, их оптимизация и практическое применение выглядят как актуальные направления исследований в области совершенствования пищевых технологий. Возможным путем этого может быть введение в пищевую традиционную технологию теплового насоса.