

## Изследване на вакуумно-тръбни слънчеви колектори в условията на България

**Автори: доц. д-р Станко Щраков, Антон Стоилов, Борислав Малинов**  
**E-mail: [sshtrakov@abv.bg](mailto:sshtrakov@abv.bg) ; [antonstoilov@abv.bg](mailto:antonstoilov@abv.bg)**

В своята история човечеството най-дълго време е разчитало и вероятно ще разчита и в бъдеще на слънчевата енергия. В сегашния момент въпросът с въвеждане на алтернативни на органичните горива енергийни носители е особено актуален. Слънчевата енергия е първоизточник на органичните горива (акумулирана в продължение на милиони години слънчева енергия), но тя е и важна алтернатива за задоволяване на енергийните потребности на човечеството. Термичните методи за оползотворяване на слънчева енергия изискват по-малки разходи и инвестиции, поради което техният дял в общия енергиен баланс на възобновяемите енергийни източници става все по-осезаем. Слънчевите инсталации за топла вода добиват все по-голяма популярност през последните години в България, предвид на добрите климатични условия за целогодишно използване на слънчевата енергия. За инсталации, които се използват предимно в битовия сектор, температурно стратифицираните акумулатори за топла вода представляват съществена част от ефективната инсталационна схема. Стратифицираният акумулиращ съд е топлинно и икономически по-ефективен. Горните слоеве в акумулатора, където се реализира консумацията на топла вода, са винаги по-топли от долните слоеве. Входящият за слънчевите колектори флуид обикновено се „взима“ от долните слоеве на акумулатора (с по-ниска температура) и това определя оптимална енергийна ефективност на слънчевите колектори.

Важен елемент от топлинната схема на слънчевите инсталации за топла вода са слънчевите колектори. Те се развиват и усъвършенстват повече от 120 години и през този период са предлагани различни конструктивни и схемни решения. Въпреки дългия период на развитие, основният принцип на преобразуване на слънчевата енергия в топлина при термичните слънчеви колектори остава непроменен. В основата на този принцип стои процесът на поглъщане на слънчева енергия от абсорбираща повърхност, преобразуването ѝ в топлина и съхраняване на топлинната енергия чрез използване на така нареченият ‘парников’ ефект и топлинна изолация.

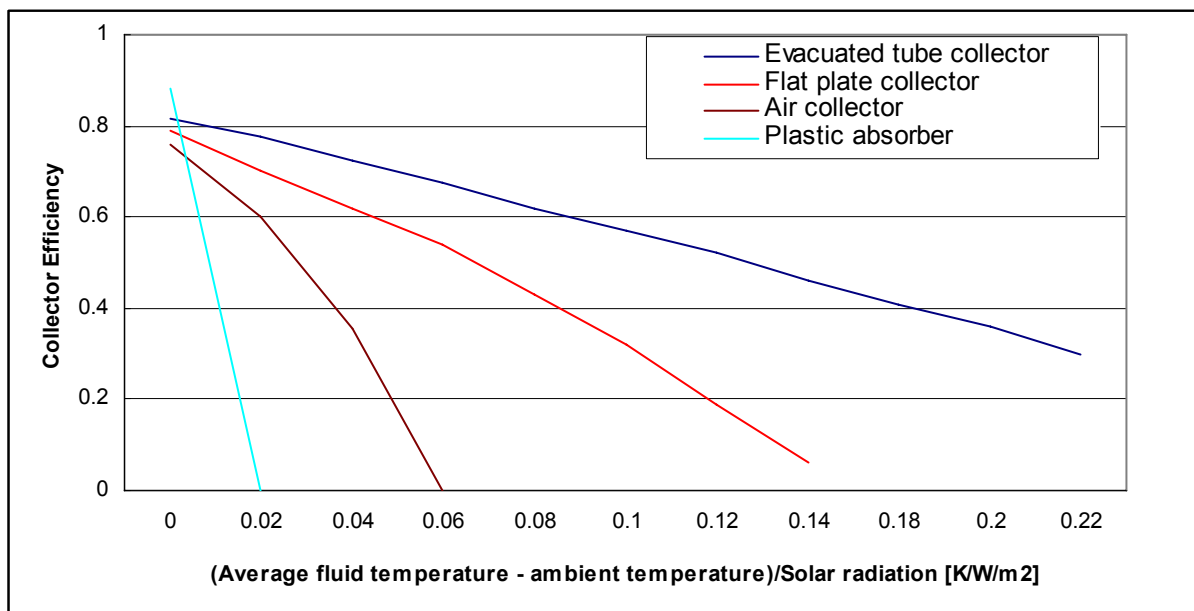
Бързото развитие на термичните слънчеви системи се обуславя както от високия коефициент на преобразуване на слънчевата енергия в топлина (в сравнение с фотоволтаичните панели), така и от невисоките разходи за изграждане на инсталациите. Общата площ на слънчевите колектори, монтирани в настоящия момент в света се оценява на около 58000000 м<sup>2</sup> [2]. Тази стойност постоянно се увеличава, като се въвеждат нови технологии и топлинни схеми на работа.

За слънчеви инсталации за топла вода се използват два основни типа слънчеви колектори: плоски слънчеви колектори, при които абсорбиращата площ е равна на общата колекторна площ и тръбни слънчеви колектори, при които абсорбиращият елемент е монтиран във вакуумирана стъклена тръба. Тръбните слънчеви колектори могат да съдържат вътре във вакуумираната тръба или извън нея линейно параболично огледало (рефлектор), което фокусира част от слънчевите лъчи върху абсорбера. Нормалната температура, до която се загрява работния флуид във плоските слънчеви колектори е от 40 до 70 °С (по-висока при използване на селективно покритие на абсорбиращия елемент на колектора). Въвеждането на вакуумиран елемент във вакуумо-тръбните слънчеви колектори обуславя значително по-ниски топлинни загуби на колектора, тъй като се елиминира конвективната компонента на топлинния поток към околната среда. В комбинация със селективно покритие на абсорбиращия елемент и

рефлектираща повърхност, интензивността на преобразуваната в топлина слънчева енергия за единица абсорбираща площ при вакуумно-тръбните слънчеви колектори се увеличава значително. Това обуславя възможността за получаване на по-висока температура на флуида в слънчевия колектор при по-ниски топлинни загуби.

На фиг. 1 е показано типичното изменение на ефективността на различни типове слънчеви колектори: плосък, вакуумо-тръбен, въздушен слънчев колектор и обикновен пласмасов или метален абсорбер без прозрачно покритие [2]. По ординатната ос е нанесен коефициентът на полезно действие на слънчевия колектор, а по абсцисната ос – параметър  $f$ , който отчита променливите условия на работа на колектора. Параметърът  $f$  е отношение на температурната разлика между флуида в колектора и въздуха в околната среда (величина, определяща топлинните загуби) и попадащата върху колектора слънчева радиация -  $f = \frac{T_f - T_a}{q_s}$ , където  $T_f$  е средната температура на флуида във слънчевите колектори, [C];  $T_a$  - температура на въздуха, [C] и  $q_s$  - попаднала върху повърхността на слънчевите колектори слънчева радиация, [W].

Когато параметърът  $f$  е нула (температурата на флуида е равна на температурата на въздуха в околната среда) липсват топлинни загуби от слънчевия колектор към околната среда и ефективността на колектора се определя само от оптичните характеристики на прозрачното покритие и абсорбера. Затова най-висок коефициент на полезно действие в този случай има обикновения абсорбер без прозрачно покритие (няма оптични загуби в прозрачните покрития). Високата ефективност на вакуумно-тръбните слънчеви колектори се проявява при високи стойности на параметъра  $f$  – когато температурната разлика между флуида и околния въздух е висока или когато има ниска слънчева радиация. Това са случаите на ниска температура на околния въздух (през зимния и преходните периоди) или когато е необходима по-висока температура на флуида (за технологични цели).



Фигура 1. Коефициент на полезно действие на слънчеви колектори

Този анализ показва, че типът на слънчевите колектори, които се използват в конкретни случаи, трябва да се определя внимателно с отчитане на изискванията на потребителя на топлинна енергия и климатичния район, в който се изпълнява инсталацията. Така например, слънчев колектор проектиран за работа с висока температура на флуида, няма да работи много

по-ефективно при нискотемпературно използване, отколкото някой по-евтин слънчев колектор, проектиран специално за нискотемпературно приложение. Същото може да се каже за работа на слънчевите колектори през зимата или през преходните периоди. Коектор, проектиран за ефективна работа през студените периоди няма да бъде много по-ефективен през летните месеци, от обикновен плосък слънчев колектор. Както се вижда от фигура 1 няма универсален най-добър слънчев колектор. Като пример може да се посочи че, за ниско-температурни приложения в области с висока интензивност на слънчевата радиация и висока температура на околния въздух, оптимален може да се окаже обикновен абсорбер без прозрачно покритие или дори обикновен съд с тъмно оцветена повърхност.

Практиката на изграждане на слънчеви инсталации за топла вода в нашата страна показва, че икономически целесъобразно е да се използват схеми и елементи с ниски производствени разходи (и недотам висока енергийна ефективност) или инсталации с високи показатели за енергийна ефективност и по-големи производствени разходи. Тези алтернативни подходи са свързани с използването на евтини плоски слънчеви колектори (с или без селективно покритие) или високоефективни вакуумно-тръбни слънчеви колектори. Вариантът с вакуумни колектори винаги трябва да се разглежда като инсталационна схема за работа през цялата година, тъй като разликата в ефективността им спрямо плоските слънчеви колектори е особено явна през периодите с по-ниски външни температури. Плоските слънчеви колектори могат да се използват както за работа през цялата година (през зимата с ниска ефективност), така и само за летния и преходните сезони. Във втория случай системата не изисква специална грижа за предпазване от замръзване на работния флуид през зимата.

Анализът за енергийната ефективност на всяка схема на слънчева инсталация с конкретно оборудване е свързан с влиянието на много фактори (географски район, цени на съоръжения, цени на конвенционалната енергия и други), но от съществено значение са характеристиките за енергийна ефективност на слънчевите колектори. В Югозападен университет „Неофит Рилски” – гр. Благоевград от три години се провеждат дългосрочни изследвания за работата на слънчева инсталация за топла вода при различни режими на работа. Някои резултати от изследванията на слънчеви системи с плоски слънчеви колектори са представени в [1,3]. Публикуваните резултати позволяват да се извършват технико-икономически анализи за рентабилността на слънчевите инсталации.

Вакуумно-тръбните слънчеви колектори са значително по-скъпи от обикновените плоски колектори, поради което от съществена важност е правилният технико-икономически анализ за работата на слънчевите инсталации с този тип съоръжения. За получаване на достоверни данни за работа в реални условия на вакуумно-тръбни слънчеви колектори през 2006 година бяха проведени изследвания на слънчева инсталация за топла вода с този тип слънчеви колектори. Инсталацията беше изследвана през зимния период и пролетта и резултатите са сравнени с резултатите от изследванията на инсталацията с плоски слънчеви колектори.

Проведените изпитания на вакуумно-тръбен слънчев колектор бяха осъществени със съдействието на фирма „Бора-97”, чиято собственост е изследваният вакуумно-тръбен слънчев колектор. Използван беше слънчев колектор СРС 6 ОЕМ с площ  $1 \text{ m}^2$  – произведен в Германия (фиг. 2 – вакуумотръбният колектор е показан в горния ляв ъгъл на комбинираната снимка). Слънчевият колектор използва СРС система за концентриране на слънчевата енергия.

Изпитанията бяха проведени с помощта на лабораторен модул за термично преобразуване на слънчева енергия в Югозападен Университет „Неофит Рилски”. Описание на инсталацията може да се намери в [1,3], а комбиниран поглед към отделните елементи на инсталацията се вижда на фиг. 2. Инсталацията работи с акумулатор с вградена топлообменна серпентина и осигурена температурна стратификация в процеса на акумулиране на топлината [3]. За изследванията на вакуумно-тръбния слънчев колектор бяха осигурени аналогични режими на работа както на плоския слънчев колектор с цел да се направят сравнителни анализи

за ефективността на работа на системите. Изпитанията бяха проведени със симулиране на стандартно разпределение на дневната консумация на топла вода за два стойности на дневната норма на консумация на топла вода - 60 л/ден и 120 л/ден. Използвана беше моновалентна схема на работа на инсталацията (без допълнителен източник), за да се елиминира влиянието на допълнителния енергиен източник в процеса на оползотворяване на слънчевата енергия.



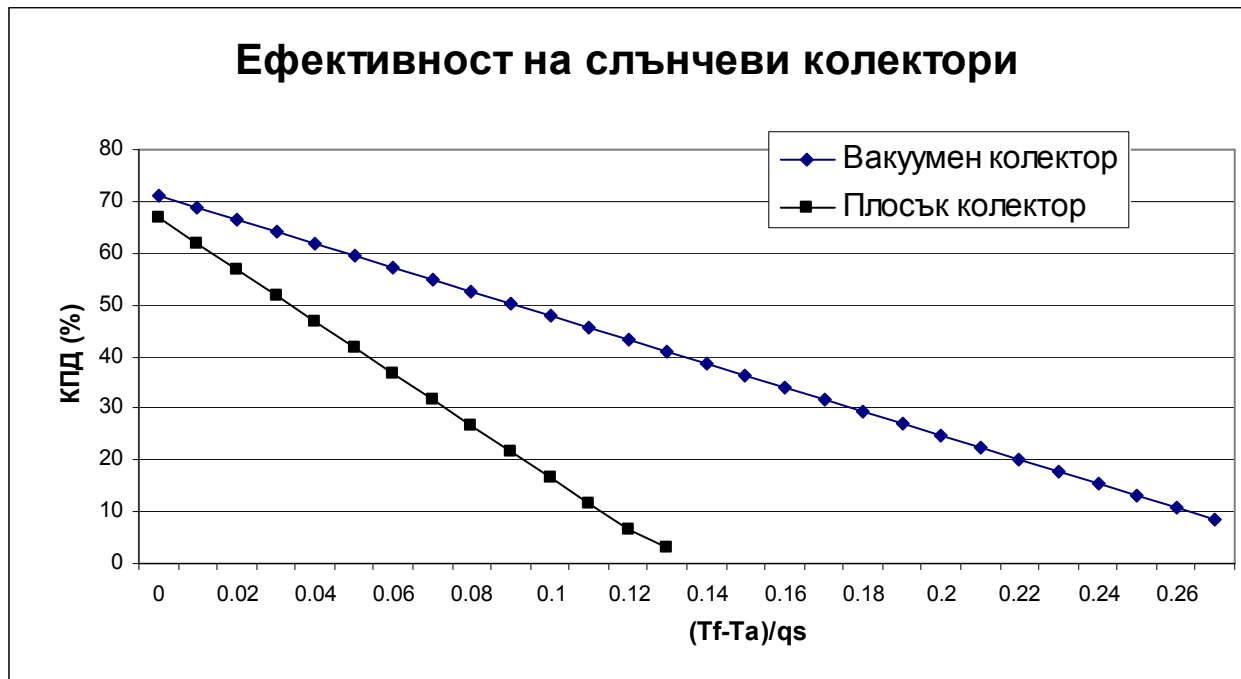
Фиг. 2. Експериментална слънчева система

В процеса на изпитанията бяха измервани температурата на водата в акумулатора (различни слоеве по височина), температурата на входящия и изходящия флуид в слънчевия колектор, температурата на околния въздух, оползотворяваната топлинна мощност и слънчевата радиация. Бяха проведени непрекъснати изпитания при различни климатични условия и резултатите бяха анализирани за определяне на термичната ефективност на слънчевите колектори.

В резултат на проведените анализи на експерименталните данни от изпитанията е определена термодинамичната характеристика на изследвания слънчев колектор (коефициент на полезно действие). На база на проведените по-рано експерименти с плосък слънчев колектор е направено сравнение между термодинамичните характеристики на двата типа колектори. На фиг. 3 е представено изменението на термичната ефективност на плосък и вакуумно-тръбен слънчев колектор при различни климатични условия. Както се вижда от графиката, характерът на изменение на кривите за коефициента на полезно действие е подобен на този от фигура 1, но стойностите на коефициента са малко по-ниски. Това се дължи както на специфичните конструктивни характеристики на изследваните колектори, така и на влошените оптични характеристики на колекторите в процеса на експлоатация. Тук трябва да се отнесе неизбежното замърсяване на повърхността на колекторите в процеса на работа и заскрежаването, което е често явление в сутрешните часове през зимния период (фиг.4).

От графиките може да се определи реално оползотворяваната слънчева енергия при различни температури на флуида и околната среда и слънчева радиация, попадаща върху

повърхността на слънчевите колектори. Тези данни могат да се използват за определяне на технико-икономическата ефективност на дадена инсталация.



Фиг.3. Термодинамични характеристики на вакуумен и плосък слънчеви колектори

Както се вижда от графиката изследваните вакуумно-тръбни слънчеви колектори имат достатъчно добри качества, за да се използват за подготовка на топла вода за средно температурни процеси, както и за работа през студените периоди от годината. При нискотемпературни процеси и при високи стойности на слънчевата радиация и висока температура на въздуха (летен период) ефективността на вакуумно-тръбните слънчеви колектори не превъзхожда много плоските слънчеви колектор.

През изследвания период климатичните условия се променяха в доста широк диапазон и получените резултати могат да се използват за анализ на ефективността на работа слънчевия колектор при реални експлоатационни условия. Имаше периоди, през които слънчевата радиация беше висока, но външните температури ниски, или слаба интензивност на слънчевата радиация и не много ниски външни температури. Трябва да се отбележи, че през зимните месеци слънчевия колектор работеше при доста утежнени условия поради заскрежаване на горната повърхност на тръбите на колектора (фиг. 4). Това заскрежаване се наблюдаваше много често и се задържаше почти до обяд (11 - 12h). Въпреки заскрежаването обаче, слънчевият колектор работеше с доста висока ефективност и това може да се види от представените графики за работа на слънчевата инсталация през различни периоди от изследвания период.

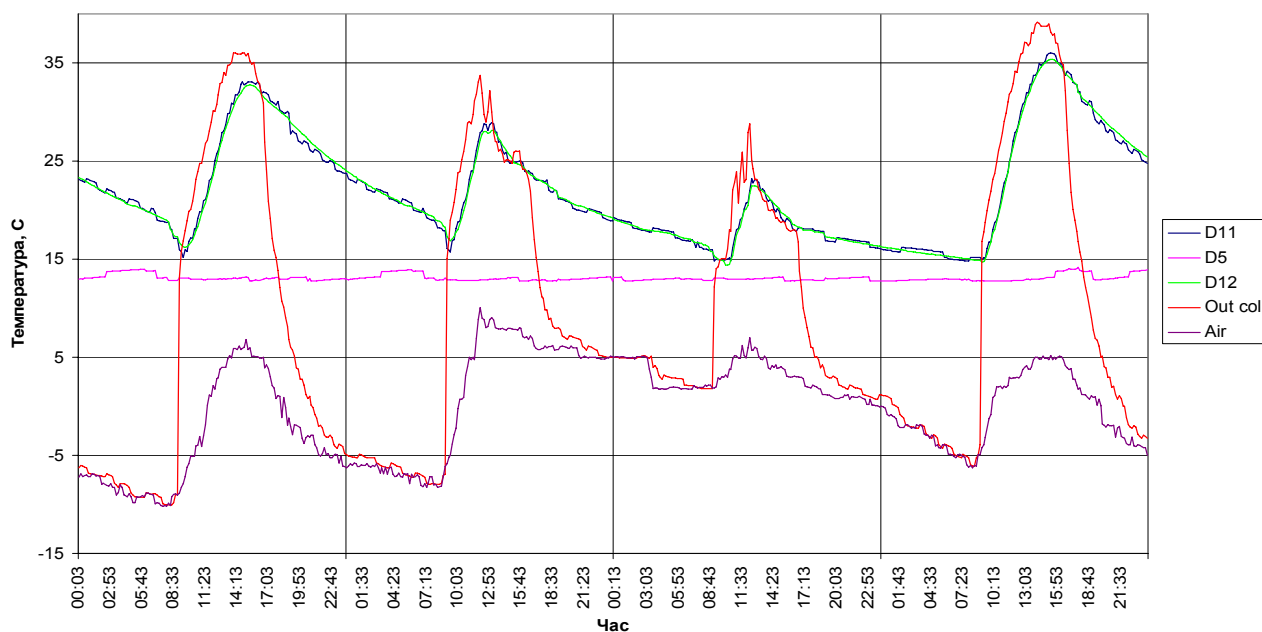
На следващите фигури са представени няколко примера на изменение на измерваните температури за различни характерни периоди от работата на слънчевата система. На графиките са показани следните параметри:

- Air – температура на въздуха;
- Out col – изходяща (максимална) температура на колектора;
- D12 – температура в най-горния слой на акумулатора;
- D11 – температура във втория слой на акумулатора;
- D5 – температура в долните слоеве на акумулатора;



Фиг. 4. Слънчев колектор със заскрежена повърхност.

Температурен ход 17-01-2006 - 20-01-2006



Фиг. 5. Ход на температурите за тридневен период през м. Януари

От представените резултати се вижда, че вакуумно-тръбният слънчев колектор оплозотворява доста ефективно попадащата слънчева радиация. В дните когато не е налице директно слънчево граене (началния период на фиг. 7) слънчевият колектор оползотворява дифузната слънчева радиация дори и при температури на околния въздух под  $0^{\circ}\text{C}$ . За такива периоди плоските слънчеви колектори не реализират топлинна енергия (загубите им са по-високи от оползотворената слънчева енергия). Тази ефективност за съжаление не дава голям принос в обия сумарен баланс поради ниските стойности на дифузната слънчева радиация.

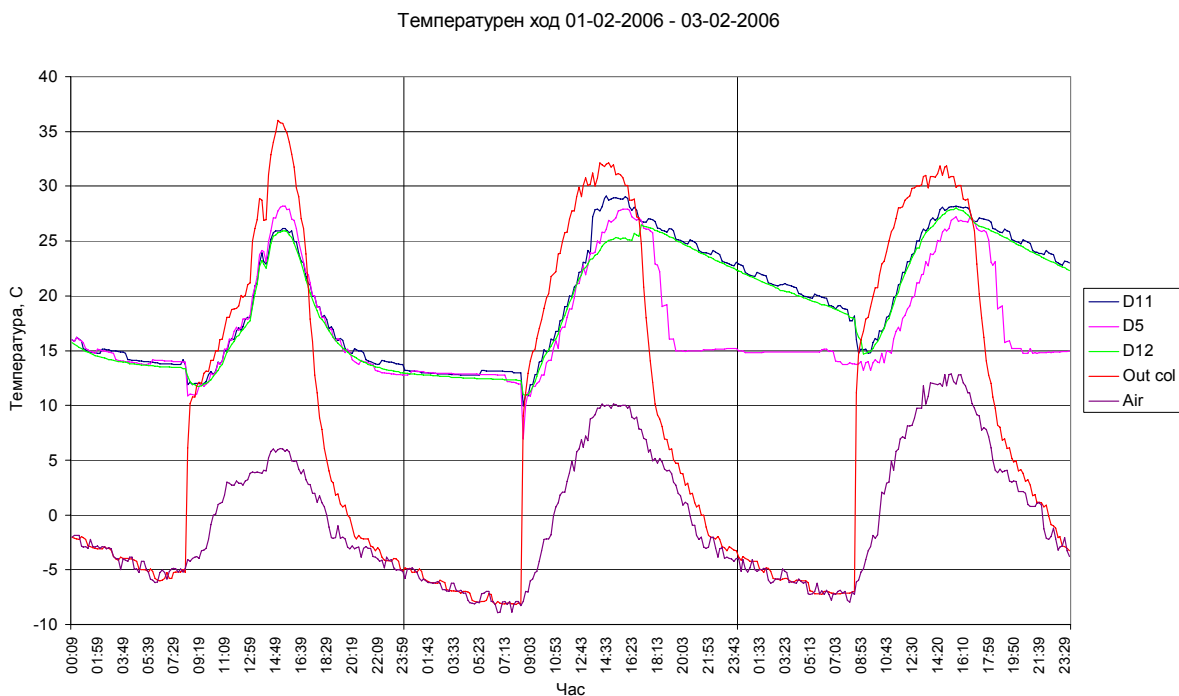
Високата ефективност на работа на вакуумно-тръбния слънчев колектор може да се види от фигури 5 и 6. Това са периоди през м. Януари и Февруари, характеризиращи се с ниски температури на околния въздух ( $-5 \div -8^{\circ}\text{C}$ ), но с наличие на директно слънчево греене. Вижда се,



че при стандартната норма на консумация на топла вода се получават температури на водата над 30°C, което изисква малко дозагриване до необходимата за консумация температура. При същите условия плоските слънчеви колектори работят с доста по-ниска ефективност. Когато външните температури са по-високи разликата между ефективността на плоските и вакуумно-тръбните слънчеви колектори намалява.

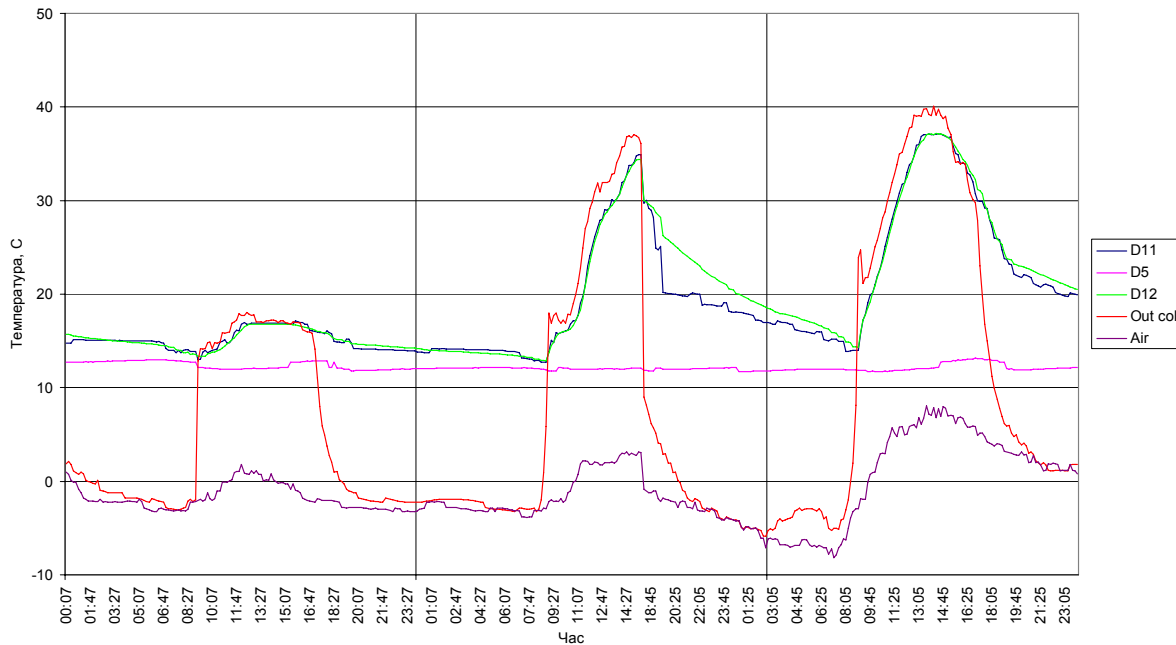
На фиг. 8 е показано изменението на параметрите на слънчевата инсталация при по-продължителен период (8 денонощия) и при типични условия на преходен режим. Тук се отчита ефектът от акумулирането на енергията при един относително дълъг и устойчив режим на експлоатация.

На основата на данните за температурното разпределение и измервания ход на изменение на оползотворяваната топлинна мощност е направен обобщен анализ за енергийния баланс на инсталацията. За разглеждания период е извършено сравнение на сумарните енергийни баланси на слънчевата система при работа с плосък и вакуумно-тръбен слънчев колектор. При този анализ е използвана и разработената компютърна програма за симулационни изчисления на слънчеви инсталации за топла вода [1]. Това се налага, защото двата типа слънчеви колектори са изследвани за еднакъв период от годината, но климатичните условия са били различни (данните за плоския слънчев колектор са от 2004 и 2005 година). Освен това, по-полезни оценки се получават, когато се използват климатични данни не за конкретен период от време, а за типични (осреднени) климатични условия за даден район.



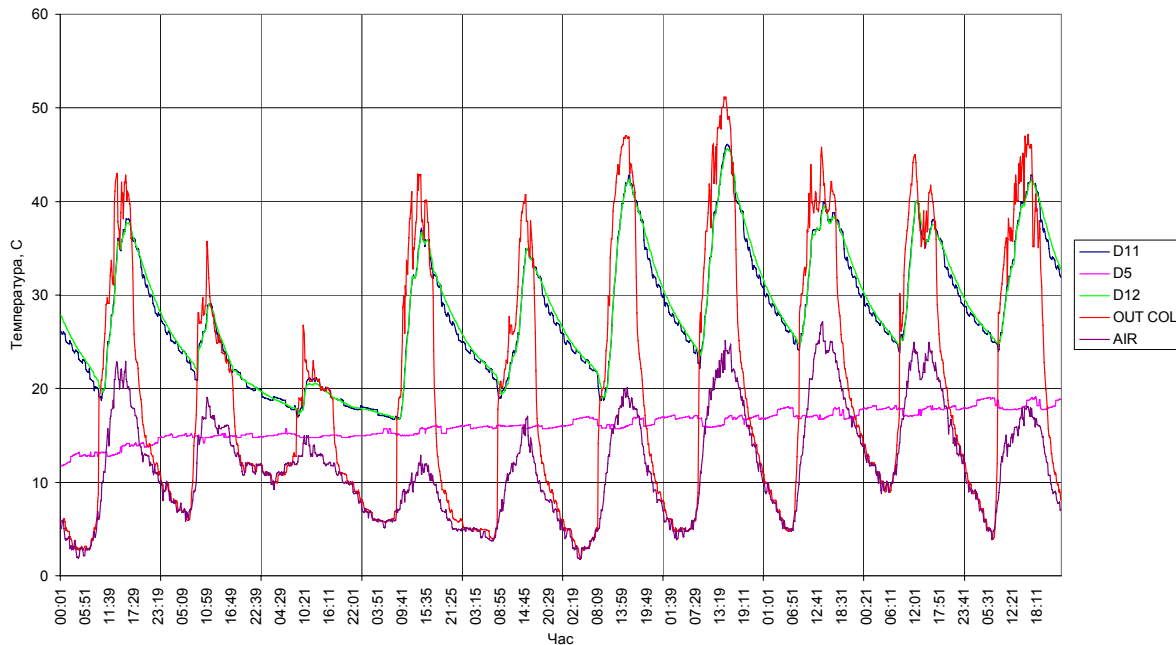
Фиг. 6. Ход на температурите за тридневен период през м. Февруари

Температурен ход 07-03-2006 - 09-03-2006



Фиг. 7. Ход на температуриите за триденев период през м. Март

Температурен ход 21-03-2006 - 30-03-2006



Фиг. 8. Ход на температуриите за деветдневен период през м. Март

Данни за енергийния баланс на експерименталната слънчева инсталация за периода на изследване (януари - април) за двата типа слънчеви колектори са дадени в таблици 1 и 2. В тях са представени осреднени месечни данни за попадналата върху слънчевите колектори слънчева



радиация, оползотворената слънчева енергия и частта от необходимата за загряване на водата енергия, която се доставя от слънчевия колектор (% на слънчево покритие). Дадени са и сумарни резултати за разглеждания период. Вижда се, че вакуумно-тръбният слънчев колектор осигурява с около 30% по-голямо количество енергия от обикновения плосък слънчев колектор. Може да се отбележи, че за отделни периоди (когато температурата на външния въздух е ниска и има слънчево греене) вакуумно-тръбният слънчев колектор работи много по-ефективно от плоския, но тези високи резултати се осредняват с другите периоди и сумарно се получават данните показани в таблицата. Трябва да се има пред вид, че данните за продължителен период са меродавни за икономическата ефективност при използване на дадено съоръжение.

Таблица 1. Вакуумно-тръбен слънчев колектор

Месец	Попаднала сл.радиация (средна) kWh/ден	Оползотворена енергия kWh/month	% сл. покритие
1	1.33	23.43	24.05
2	2.15	42.20	47.96
3	2.51	52.03	53.41
4	3.14	63.00	66.82
Сумарна слънчева радиация за периода		[kWh]: 273	
Сумарна топл. енергия за затопляне на водата		[kWh]: 377	
Среден процент слънчево покритие за периода :		48	
Сумарна оползотворена за периода		[kWh]: 181	

Таблица 2. Плосък слънчев колектор

Месец	Попаднала сл.радиация (средна) kWh/ден	Оползотворена енергия kWh/month	% сл. покритие
1	1.33	13.98	14.35
2	2.15	29.44	33.46
3	2.51	37.73	38.73
4	3,14	48.13	51.05
Сумарна слънчева радиация за периода		[kWh]: 273	
Сумарна топл. енергия за затопляне на водата		[kWh]: 377	
Среден процент слънчево покритие за периода :		34	
Сумарна оползотворена енергия за периода		[kWh]: 129	

За технико-икономическите анализи значение има оползотворената енергия за цялата година или за периода на използване в годината. Оценка за целогодишната работа на инсталции с плосък и вакуумотръбен колектор е показана в следващите таблици 3 и 4.

Слънчевата инсталация с вакуумотръбен слънчев колектор осигурява около 23 % по-голямо количество енергия при типични климатични условия за района на гр. Благоевград. Данните се отнася за слънчева инсталация с оптимизиран режим на акумулиране на топлинна енергия и осигурена топлинна стратификация в акумулатора.

Тъй като представените резултати за енергийния баланс се отнасят за колекторно поле с  $1 \text{ m}^2$ , лесно може да се преизчислява (приблизително) оползотворяваната енергия за инсталции с друга колекторна площ. Това е необходимо за оценка на икономическата рентабилност на дадено схемно решение на слънчева енергия.

Таблица 3. Резултати за инсталация с вакуумотръбен колектор

Месец	Попаднала сл.радиация kWh/ден	Конс. Енергия kWh/month	% сл. покритие
1	1.33	23.43	24.05
2	2.15	42.20	47.96
3	2.51	52.03	53.41
4	3.14	63.00	66.82
5	3.46	70.46	72.33
6	3.80	74.28	78.79
7	4.17	87.05	89.36
8	3.99	89.96	92.35
9	3.47	82.32	87.32
10	2.69	70.26	72.12
11	1.73	39.41	41.80
12	1.22	20.21	20.74
Сумарна слънчева радиация за периода [kWh]:			1025
Сумарна топлинна енергия за затопляне на водата [kWh]:			1147
Среден процент слънчево покритие за периода :			62
Сумарна оползотворена енергия за периода [kWh]:			715

Таблица 4. Резултати за инсталация с плосък колектор

Месец	Попаднала сл.радиация kWh/ден	Конс. Енергия kWh/month	% сл. покритие
1	1.33	13.98	14.35
2	2.15	29.44	33.46
3	2.51	37.73	38.73
4	3.14	48.13	51.05
5	3.46	56.07	57.56
6	3.80	60.37	64.03
7	4.17	71.10	72.98
8	3.99	73.61	75.57
9	3.47	66.19	70.21
10	2.69	55.19	56.66
11	1.73	29.74	31.55
12	1.22	12.86	13.20
Сумарна слънчева радиация за периода [kWh]:			1025
Сумарна топлинна енергия за затопляне на водата [kWh]:			1147
Среден процент слънчево покритие за периода :			48
Сумарна оползотворена енергия за периода [kWh]:			554

#### Литература

1. Strakov St., Stoilov A. 2004. Thermal Accumulation in Solar Systems for Hot Water , The *5th ISES EUROPE SOLAR CONFERENCE EuroSun 2004*, Proceedings, Freiburg, pp. 678-686
2. Norton Br., Anatomy of a Solar Collector, REFOCUS, ISES May/June 2006, pp.32-35.
3. Щраков Ст., А. Стоилов, В. Вълков и Д. Манолев, Слънчеви инсталации за топла вода със стратифицирано акумулиране, сп. "Топлотехника за бита", бр.10/2003, с. 4-8 (2003).