

## **Работоспособност на слънчеви инсталации за топла вода със стратифицирани топлинни акумулатори**

Д-р инж. Станко Вл. Щраков,  
Югозападен университет "Неофит Рилски", бул. "Иван Михайлов" No 66, 2700 –  
Благоевград; E-mail: [sshtrakov@yahoo.com](mailto:sshtrakov@yahoo.com)

### **1. Въведение**

Акумулирането на топлинна енергия с температурно разслоение (стратификация) в термичните слънчеви инсталации за топла вода се осъществява, когато в един и същи обем топлината на горещия флуид (вода) се акумулира над по-студените слоеве в акумулатора. Студения флуид от долната част на акумулатора, при преминаване през колектора, се загрява и се премества в горната част, където остава поради по-малкото си обемно тегло. Условната разделителна повърхнина между топлата и студената зона в акумулатора, в процеса на зареждане се придвижва надолу. В процеса на консумация на топла вода се извършва обратно движение на условната разделителна повърхнина – отдолу нагоре.

Най-добра ефективност на слънчевите системи за топла вода се получава ако топлинните им акумулатори са перфектно стратифицирани - това означава че няма смесване на водата от различните области (слоеве) в акумулатора с различни температури. Компютърните симулации на системи с температурно разслоение в топлинните акумулатори показват, че ако се използва оптимален дебит в колекторния кръг, термичната ефективност може да достигне 38% по-висока стойност, в сравнение със съответната система, чийто акумулатор е с пълно смесване на водата в процеса на работа [3]. При реалните топлинни акумулатори със стратификация, температурното разслоение винаги деградира (намалява) в известна степен. Многобройните изследвания показват че, основният механизъм, намаляващ стратификацията е струйното вливане на водата, което се случва, когато късно през деня по-студената вода от колектора постъпва в горната част на акумулатора, където е разположен най-топлия слой вода. Падащата струя, с по-ниска температура, навлиза в горещите слоеве и смесвайки се с тях разрушава (намалява) съществуващата стратификация. Относителната загуба на стратификация в този процес може да достигне 10%.

Стратификацията в топлинните акумулатори зависи главно от обема на резервоара, размерите му, местонахождението и дизайна на вътрешните и външните елементи за циркулация на водата, количеството на постъпващия и изтичащ флуиди. Има няколко 'дестратифициращи' фактора, които допринасят за загубата или намаляването на съхраняваната енергия в топлинните акумулатори: (a) топлинни загуби към обкръжаващата среда; (b) топлопроводност в течността от горещите към студените слоеве в течността; (c) вертикална топлопроводност в конструкцията на акумулатора (стени), което заедно със (a) предизвикват конвективни течения (смесване) и (d) смесване по време на разреждащите и зареждащите цикли при работата на топлинните акумулатори. Фактор (d) е основната причина за намаляване на стратификацията по температурни нива.

### **2. Теоретични модели за стратифицирани топлинни акумулатори**

За симулационните изчисления на процесите в термични слънчеви системи за топла вода се използват различни теоретични модели на стратификация в топлинните акумулатори. В настоящата работа е направено сравнение на четири модела за

организация на зареждане и разреждане на топлинния акумулатор в термичните слънчеви системи.

## 2.1 Многослоен модел

В многослойния модел [1,2], резервоарът се моделира като последователност от  $N$  напълно смесени обемни сегменти (Фиг.1). Точността на моделиране на стратификацията се определя от избора на броя на секторите  $N$ . При по-високи стойности на  $N$  стратификацията се отчита по-точно. За случай на  $N=1$  резервоарът се моделиран като напълно смесен (нестратифициран) топлинен акумулатор. Могат да бъде използвани модели с еднакви или нееднакви по размер сектори.

За модел с еднакви по размери сектори, се предполага че, флуидът от горещия източник (слънчевите колектори) постъпва в точно определения сектор (със съответната температура) или в горния край на акумулатора.

За многослойните модели се приема, че флуидните потоци нагоре (при консумация на вода) и надолу (при зареждане от колекторното поле) се смесват преди да са постъпили, в който и да е слой. Използвайки фиг.1 това допускане се изразява в това, че масата  $m_{col}$  (масата постъпваща от слънчевите колектори) се прибавя към  $M_i$  и се определя средна температура на флуида, която е новата температура на  $i$ -тия слой. Количество  $m_{col}$  (което е в повече за  $i$  – тия сектор) с изчислената средна температура се прибавя към  $m_{i-1}$  и за този слой се изчислява нова средна температура и т.н. За консумацията на вода се извършват подобни изчислителни процедури, като от най-горния слой се отнема определена маса вода, която се компенсира от долните слоеве със съответната температура. За най-долния слой компенсацията е с вода от водопроводната мрежа с температура  $T_{net}$ .

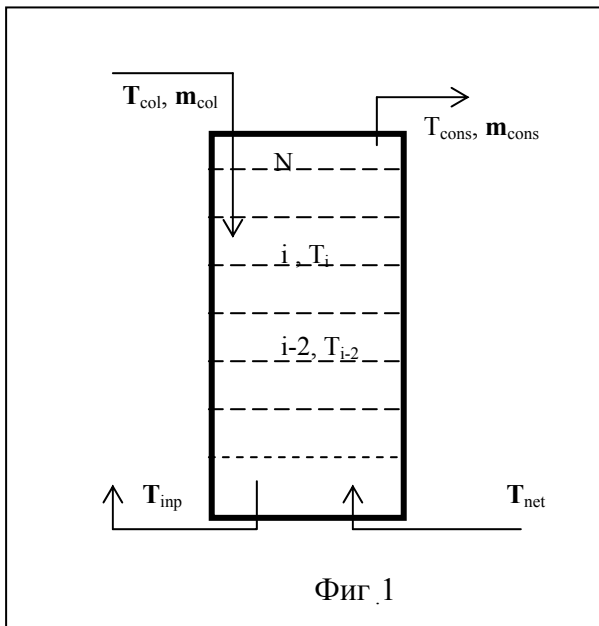
Енергийният баланс за  $i$ -тия слой на резервоара е:

$$M_i C_f \frac{dT_i}{dt} = \alpha_i m_{col} C_f (T_{col} - T_i) + \beta_i m_{cons} C_f (T_{cons} - T_i) + \delta_i \gamma_i C_f (T_{i-1} - T_i) + (1 - \delta_i) \gamma_i C_f (T_i - T_{i+1}) + \varepsilon Q_{e,i} - (1 - \varepsilon) UA_{fl,i} (T_i - T_{i-1}) - UA_i (T_i - T_a) \quad (1)$$

където  $T_i$  – температура в  $i$  – тия слой на акумулатора [ $^{\circ}C$ ];

$T_{cons}$  – температура на консумация [ $^{\circ}C$ ];

$T_{col}$  – температура на изхода от колекторите [ $^{\circ}C$ ];



$M_i$  – маса на водата в  $i$  – тия слой [kg];

$m_{col}, m_{cons}$  – масов дебит в колекторния кръг и консумация [kg/h];

$UA_i$  – Фактор на топлинни загуби към околната среда [W/K];

$UA_{fl,i}$  – Фактор на топлообмен чрез топлопроводност между слоевете [W/K];

$C_f$  – специфичен топлинен капацитет на флуида (водата), [J/kgK]

$Q_{e,i}$  - Енергия от допълнителния източник [J];

$\alpha_i=1$  , ако флуидът от топлинния източник (колектора) влиза в  $i$ -тият слой,

0 ако условието не е изпълнено.

$\beta_i = 1$  , ако консумация на флуид се извършва от  $i$ -тият слой: 0 – в противен случай

$$\gamma_i = m_{монл.} \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_j - m_{зл.} \sum_{j=i+1}^N \beta_j$$

$$\delta_i = 1 \quad , \quad \text{за } \gamma_i \geq 0; \quad \delta_i = 0 \quad , \quad \text{за } \gamma_i \leq 0;$$

$$\varepsilon = 1 \quad , \quad \text{ако допълнителният източник е включен}; \quad \varepsilon = 0 \quad , \quad \text{в противен случай};$$

Уравненията (1) са  $N$  на брой обикновени диференциални уравнения, които могат да бъдат решено аналитично за температурите на  $N$ -те слоя, като функция на времето.

## 2.2. Поточно-изместващ модел

Поточно-изместващия модел симулира работата на топлинно-стратифициран акумулатор, използвайки променлив дебит и променливи обеми на сегментите [2,3]. Броят на сегментите и техните обеми не се контролират и зависят основно от обема на акумулатора, дебита в колекторния кръг и симулационният интервал от време. В него, резервоарът е разделен на  $N$  сегмента, всеки с обем  $V_i$  и температура  $T_i$ . В еднократен интервал, топлинният източник (слънчевите колектори) доставя обем течност  $V_i$  с температура  $T_{col}$ . Ако  $T_{col} \geq T_N$ , се добавя сегмент в най-горния участък на акумулатора и всички сектори се преместват към дъното на акумулатора, а количество течност равно на  $V_i$  се отнема от най-долния сегмент. Когато има консумация на вода от най-горния слой се отнема обем  $V_{kons}$  и всички сектори се преместват нагоре, а най-долния сектор се компенсира с вода от водопроводната мрежа с температура  $T_{net}$ . Този модел се отнася също към идеално стратифицираните механизми на акумулиране.

## 2.3 Струйно захранващ модел

Когато температурата на флуида от слънчевите колектори е с по-ниска температура от температурата на водата в най-горните слоеве на акумулатора, под действие на гравитационните сили, по-студеният флуид ще се премества надолу във вид на струя. Под действие на вискозитета и завихрянето, част от по-топлия флуид от акумулатора се влива в струята. По тази причина, влизащият флуид се загрява и пада надолу до позиция в резервоара, където неговата плътност става равна на плътността на водата в акумулатора на съответното ниво. Този процес е известен като "струйно втичане" и води до намаляване на топлинната стратификация в акумулатора.

Математичния модел на струйното захранване е разработен от Филипс и Пейт [4] и е основан на температурното разпределение и масовия баланс. Акумулаторът се моделира като две отделни секции: струен участък и останалата част от акумулатора.

Енергийният баланс за струята има вида:

$$C_f \frac{d(m_s T_s)}{dx} = C_f T_T \frac{dm_s}{dx}$$

и за резервоара

$$\rho_f A C_f \frac{dT_T}{dt} = -C_f \frac{d(m_T T_T)}{dx} + C_f T_T \frac{dm_T}{dx} + k_f A \frac{d^2 T_T}{dx^2} - U_T P_T (T_T - T_{env})$$

Запазването на масата изисква

$$\frac{dm_S}{dx} = - \frac{dm_T}{dx}$$

където  $m_S$ ,  $T_S$  са дебита и температурата на струята,

$m_T$ ,  $T_T$  - дебит и температура на водата в акумулатора

За да се решат горните уравнения за  $m_S$ ,  $m_T$ ,  $T_S(x, t)$  и  $T_T(x, t)$  е необходимо едно допълнително уравнение, което да описва как масата от резервоара захранва падащият поток

Механичният модел за вътрешното триене на струята в стратифицираната среда е много сложно. Поради тази причина се приема че, масата подхранваща струята е независима от температурата. Теорията за изотермичните струи е изследвана в [3]. Установено е, че за несиметричен поток е в сила равенството:

$$\frac{dm_S}{dx} = C \frac{m_{Tono.}}{D}$$

#### 2.4 Стратифициран топлинен акумулатор с променлив дебит

При този модел се осигурява стратификация на топлинния акумулатор посредством регулиране на дебита на флуида в акумулаторния кръг на слънчевата инсталация. Регулираща апаратура следи температурата на изхода от колекторното поле и я сравнява с температурата в горния край на топлинния акумулатор. Когато температурата на изхода от колекторите не достига температурата в най-горния сектор на акумулатора и е по-ниска от температурата на консумация, се формира управляващ сигнал към циркулационната система в колекторния кръг за намаляване на дебита на флуида, дотогава, докато не се получи изходяща температура по-висока от температурата в акумулатора. Това автоматично гарантира стратифицирано разпределение на температурата в топлинния акумулатор.

Недостатъци на този метод на управление на процеса на топлинно акумулиране са необходимостта от специална регулираща апаратура и възможността от спиране работата на инсталацията в случаите когато в горния край на акумулатора се събере вода с доста висока температура.

### 3. Изследване на слънчева система със стратифициран акумулатор

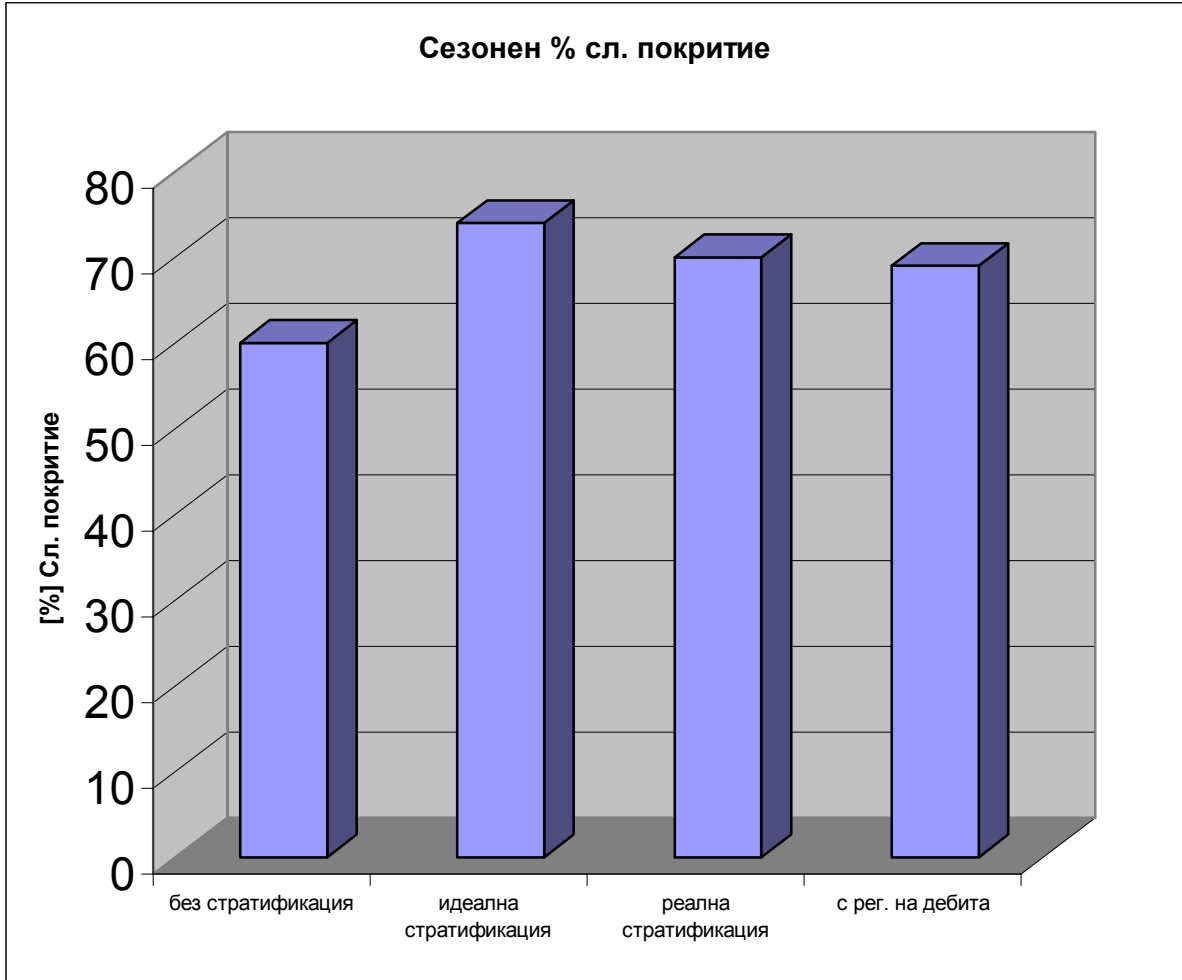
Теоретични изследвания са извършени за слънчева инсталация за топла вода, предназначена за малък хотел, намиращ се в района на град София. Дневното количество топла вода за хотела е 3000 л/ден. За климатичните условия в района на гр. София и приетата дневна норма топла вода, слънчевата инсталация трябва да се оборудва с колекторно поле с 50 м<sup>2</sup> колекторна площ и акумулиращ обем 2500 л. Проведени са теоретични изследвания за работоспособността на инсталацията за топла вода за летния период (април – октомври).

Теоретичните изследвания са проведени на базата на математически модели за струйно втичане в топлинния акумулатор, представени по-горе. За решаване на тези модели е разработена програмна система на визуалният програмен език Delphi 5.0..

Направено е сравнение на термичната ефективност на слънчевата система при следните модели на топлинно акумулиране: модел с изотермичен (напълно смесен)

акумулатор ; топлинен акумулатор с идеална стратификация (многослоен модел); топлинен акумулатор с реална стратификация (струйно-захранващ модел); стратифициран топлинен акумулатор с променлив на дебит.

На фиг. 2 е представена термичната ефективност на слънчевите системи за различните модели на топлинно акумулиране. Оценката е направена по средния сезонен процент слънчево покритие.

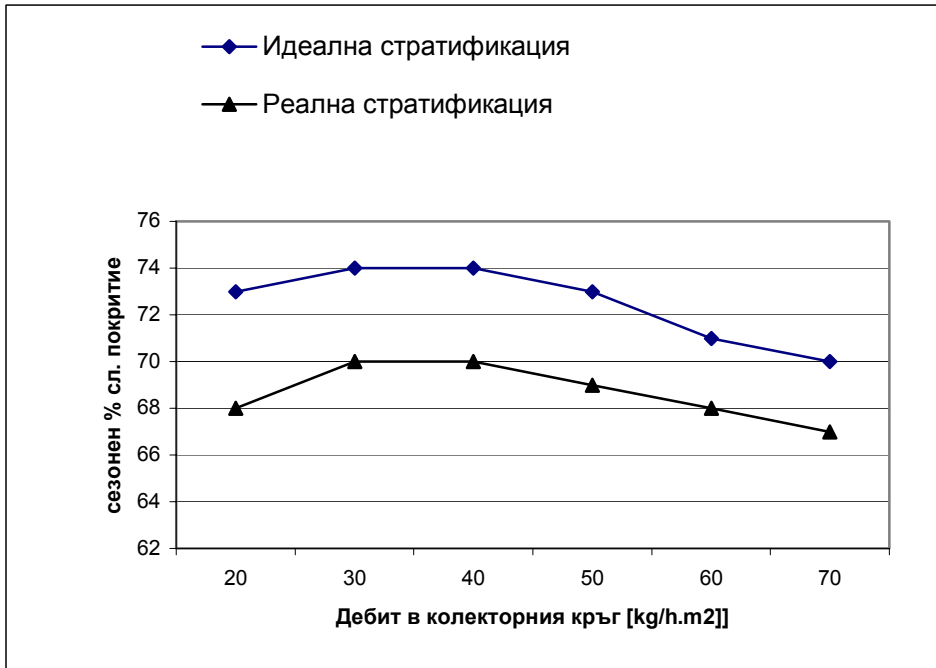


Фиг. 2

Топлинната ефективност на системите за слънчево загряване на вода зависи от температурното разпределение в топлинния акумулатор, и се определя главно от дебита на водата в колекторния кръг. Високи стойности на дебита (по-големи от  $50 \text{ kg/h, m}^2$ -колекторна площ) се използват в стандартните (нестратифицирани) слънчеви системи за топла вода.

Високият дебит на водата в колекторния кръг увеличава коефициента на отвеждане на топлината [2], което повишава коефициента на полезно действие на колекторите, разглеждани като отделни съоръжения. От друга страна високият дебит в колекторния кръг води до пълната смяна на водата в акумулатора за кратко време и поражда смесване на слоевете и уеднаквяване на температурата в резервоара. При намаляване на дебита в колекторния кръг, се получава по-висока температура на изхода на колекторите и се увеличава топлинната стратификация, което води до подобряване на общата работоспособност на системата [3,4]. Поради тези причини трябва да се използва висок или нисък дебит в колекторния кръг в зависимост от типа на топлинното акумулиране и от размера на резервоара. Средното значение на времето за пълна 'смяна на водата'

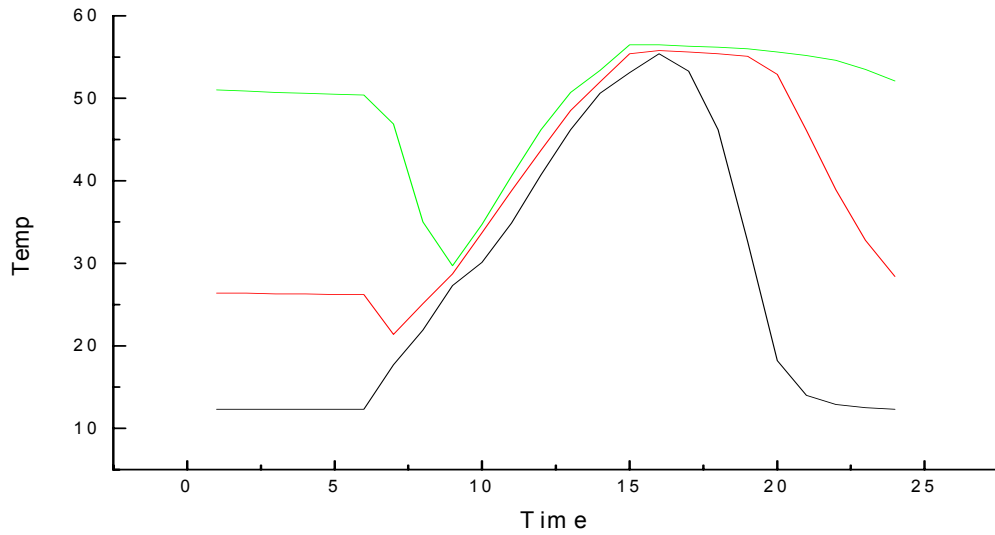
(преминаване през слънчевите колектори) в известен смисъл дава представа за количеството на смесване предизвикано от циркулацията на водата. Когато дебита в колекторния кръг е с такива стойности, че се извършва повече от 5-кратно преминаване на водата през колекторния кръг, ефектите на термична стратификация стават малки и системата работи почти като изотермичен (напълно смесен) акумулатор.



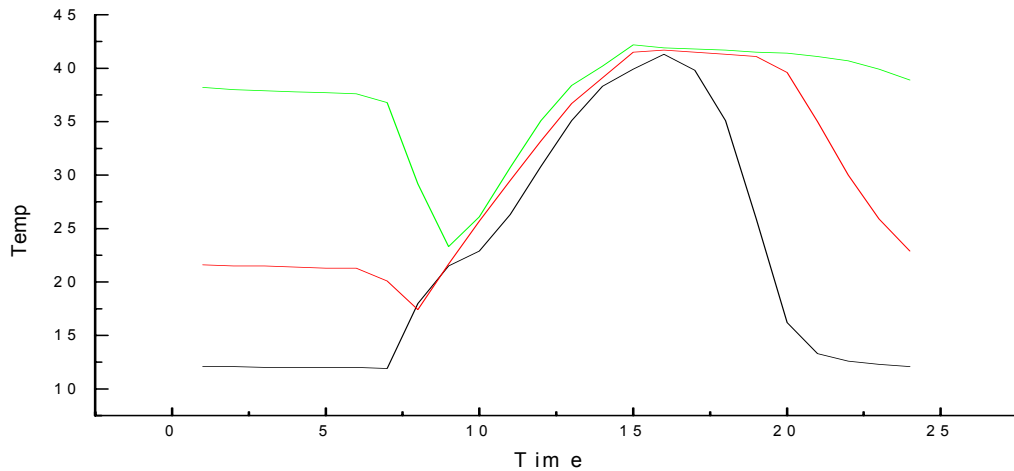
Фиг. 3

На фиг. 3 е показана зависимостта на термичната ефективност на стратифицирани топлинни акумулатори от дебита в колекторния кръг. Вижда се, че оптималните стойности на този дебит са около  $30 \text{ kg/m}^2$  колекторна площ. При намаляване на дебита под тази стойност се понижава чувствително коефициента на отвеждане на топлината (коефициента на полезно действие) на колекторите, а при увеличаването му се намаляват ефектите от стратификация.

На фиг. 4 и 5 е дадено температурното разпределение в стратифицирания акумулатор съответно с идеална и реална стратификация. Температурите се отнасят за най-горния, средния и най-ниския слой в акумулатора. Тези температурни разпределения зависят основно от режима на консумация на топла вода. Вижда се, че в периода около обедните часове (между 11 и 16 часа), разслоението е много малко, но в останалата част от денонощието има значителна стратификация на температурните нива, което определя по-голямата ефективност на този вид акумулатори спрямо напълно смесените.



Фиг. 4



Фиг. 5

**Използване литература:**

1. J.A.Duffie and W.A. Beckman, Solar Energy Thermal Processes. Wiley, New York (1974)
2. R.Kohne, K.Oertel, S. Zunft, Investigation of Control and Simulation of Solar Process Heat Plants using a Flexible test Facility, Solar Energy, 56,169-182 (1996)
3. I.N.Kaptan, A. Kilic, A Theoretical and Experimental Investigation of a Novel Built-in-Storage Solar Water Heater, Solar Energy,57,393-400 (1996)
4. H.P. prag, U. Rani, Theoretical and Experimental Studies on Collector/Storage Water Heater., Solar Energy,29, 467-478, (1982)