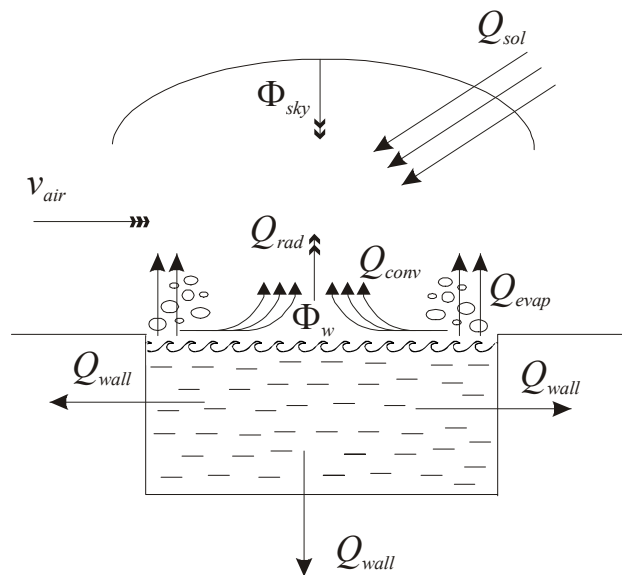


ТОПЛИНЕН БАЛАНС И ТОПЛО – МАСООБМЕННИ ПРОЦЕСИ В БАСЕЙНИ С ОТКРИТА ПЛОЩ

Автори: доц. д-р Ст. Щраков, А. Стоилов, П. Димитров
Югозападен университет “Неофит Рилски” – Благоевград
E-mail: sshtrakov@abv.bg, antonstoilov@abv.bg

Слънчевото загряване на открити пливни басейни е едно от приложенията за използването на слънчевата енергия. Исторически това е бил първият тип преобразуване на слънчева енергия. Процесите на топло и масообмен, които протичат между водната повърхност, върху която попадат слънчевите лъчи и околната среда, определят топлинното равновесие между басейна и околната среда. Познаването на тези процеси позволява да се определят зависимостите между участващите в процеса физични величини, което дава възможност за ограничаване на нежеланите процеси на топлинни загуби. Създаването на модели и тяхното детайлно изследване допринася за по-пълното разбиране на механизмите на топлинно акумулиране в басейни с откритата площ. Познаването на механизмите за топлообмен с околната среда, позволява да се определят топлинните нужди за допълнително подгриване на водата за открити слънчеви басейни. Това е особено важно, когато трябва да се проектира слънчева инсталация за топла вода за басейна.

На фиг.1 е показана схема на топлинните притоци и топлинните загуби на открит слънчево загряван басейн.



Фиг.1. Схема на топлинните притоци и топлинните загуби

Енергийните компоненти на топлинния баланс са: Q_{sol} - слънчева енергия (радиация) попадаща и абсорбирана върху повърхността на басейна, $[W]$; Q_{rad} - загуби от радиационен топлообмен към околната среда и към небосвода $[W]$; Q_{conv} - конвективни загуби от повърхността на басейна, $[W]$; Q_{evap} - загуби от излъхване (изпарение), $[W]$; Q_{wall} - загуби през стените на басейна, $[W]$.

Голямата топлинна инертност на водните басейни обуславя неголяма промяна на температурата на водата през 24-часов период (от 2° до 5°C). Това дава възможност от енергийния баланс на “типичен ден” за даден месец от годината, да се определят топлинните

загуби на басейна и да се подбере подходящ топлоизточник за подгриване на водата в басейна (площ на слънчеви колектори за слънчева инсталация).

СЛЪНЧЕВА РАДИАЦИЯ НА ПОВЪРХНОСТТА НА БАСЕЙНА

Откритата повърхност на басейна е слънчев колектор, който улавя директно слънчевото лъчение с определен коефициент на абсорбция α_{sol} . Общото количество топлина постъпващо в басейна може да се определи от следния израз:

$$Q_{sol} = q_{sol} \cdot \alpha_{sol} \cdot A_{pool}, [W],$$

където α_{sol} е средната поглъщателна способност на водата; $\alpha_{sol}=0,75 - 0,85$, A_{pool} - откритата повърхност на басейна, $[m^2]$; q_{sol} - стойност на слънчевата радиация върху хоризонтална повърхност $\left[\frac{W}{m^2} \right]$. Слънчевата радиация се променя през дневните часове поради различният ъгъл под който попадат слънчевите лъчи върху хоризонталната повърхнина на водата.

ТОПЛИННИ ЗАГУБИ

Общите топлинни загуби на басейна включват загуби от конвекция, лъчист топлообмен и излъчване:

$$Q_{pool} = Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{evap} + Q_{wall}, [W].$$

От тях в процентно отношение най-голям дял имат топлините загуби причинени от излъчване (изпарение), които възлизат на 50 и повече процента. Втори по размер са загубите от инфрачервеното излъчване от водната повърхност към небосвода, особено през ясни нощи. В същото време конвективните загуби могат да станат особено големи, когато са налице ниски дневни и нощни температури на въздуха и високи скорости на движението му (вятър). Загубите от стените и дъното са пренебрежими в сравнение с горе изложените.

Загуби от радиационен топлообмен

Водата в басейна е с определена температура и осъществява радиационен топлообмен с предметите от околната среда:

$$Q_{rad}' = \alpha_R \cdot A_{pool} \cdot (T_w - T_{air}), [W]$$

където

$$\alpha_R - \text{коефициент на радиационен топлообмен, } \left[\frac{W}{m \cdot K} \right];$$

$$T_w - \text{температура на водата в басейна, } [K];$$

$$T_{air} - \text{температура на въздуха, } [K];$$

Според [1] коефициентът на радиационен топлообмен е величина която се изменя незначително при изменение на външните условия. Той може да се приеме с голяма степен на достоверност като постоянен: $\alpha_R = 6 \frac{W}{m \cdot ^\circ C}$. Тази стойност е валидна при температура на абсорбиращата повърхност близка до тази на околната среда и висока степен на излъчване, което е валидно за нагриваните слънчеви басейни.

Акумулираната топлинна енергия в басейна предизвиква дълговълновото инфрачервено излъчване от повърхността на басейна към небосвода, което е другата компонента на радиационият топлообмен. Големината на тези загуби е пропорционална на разликата в ефективните температури на басейна и небосвода:

$$Q_{ra}'' = A_{pool} \cdot (\Phi_w - \Phi_{sky}), [W]$$

където

$$- \Phi_w = \sigma \cdot \varepsilon_w \cdot T_w^4 - \text{ефективната температура на водата в басейна; } \sigma = 5,68 \cdot 10^{-8}, \left[\frac{W}{m^2 K^4} \right] -$$

константа на Болцман; $\varepsilon_w = 0.95$ - степен на черното на водата;

$$- \Phi_{sky} = \sigma \cdot \varepsilon_{sky} \cdot T_{ros}^4 - \text{ефективната температура на небосвода; } \varepsilon_{sky} = 0.004 \cdot T_{ros} + 0.8 - \text{ степен}$$

на черното на небосвода; $T_{ros} = 273 + \left(16 \cdot \ln \left(\frac{H_{air}}{100} \cdot 631 \cdot e^{\frac{T_{air}}{15,5}} \right) - 104,5 \right), [K]; H_{air}$ - относителна влажност на въздуха, [%];

Както се вижда ефективната температура на небосвода се определя от климатичните условия. При реални условия не винаги тези фактори има възможност да се измерят затова приблизително температурата на небосвода може да се изчисли по формулата:

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_{air}^{1,5}, [K]$$

Общите топлинни загуби от радиационния топлообмен са:

$$Q_{rad} = Q_{rad}' + Q_{rad}''$$

Конвективни загуби

Количеството топлина, който се губи от повърхността на басейна чрез конвекция се изразява чрез линейната зависимост (закон на Нютон):

$$Q_{conv} = \alpha_c \cdot A_{pool} \cdot (T_w - T_{air}), [W], \quad (11)$$

където: α_c е коефициент на конвективен топлообмен $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$.

Съществено за конвективния топлообмен е определянето на коефициента на конвективен топлообмен. Той е сложна функция от много параметри и фактори, като най-силно зависи от температурите на водата и въздуха и скоростта на вятъра. Определянето на коефициента на конвективен топлообмен по теоретичен път е възможен само за някои частни случаи и при приемане на редица опростявания. Поради тази причина най-често той се определя емпирично.

Най – добри съвпадения с опитните резултати за температурния интервал $10^0\text{C} - 30^0\text{C}$ и скорост

на въздуха $v_{air} = 0.1 \div 4 \left[\frac{m}{s} \right]$ дава емпиричното уравнение

$$\alpha_c = 5,7 + 3,8 \cdot v_{air}, \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

Загуби от излъхване

Особен интерес представлява процесът на излъхване (изпарение) на вода от повърхността на басейна. Това е процес на изпарение от свободната повърхност на водата при температура, по-ниска от температурата на насищане.

Независимо какви са параметрите на влажния въздух в околната среда и на водата в басейна, на граничната повърхност между тях термодинамичните параметри на частиците са в равновесие. Това означава, че те имат еднаква температура и парциално налягане на водната

пара на свободната повърхност. То е равно на налягането на насищане при температура T_m - температурата на “мокрия” термометър.

Следователно, непосредствено на повърхността на водата влажният въздух е наситен, независимо от това какво е неговото състояние при отдалечаване от повърхността. Скоростта на изпарение от водната повърхност чрез излъхване зависи главно от скоростта на вятъра и разликата между парциалните налягания, на повърхността и далеч от нея, а количествено се определя от закона на Далтон:

$$m_{\omega} = \beta_p [p_H(t_M) - p_{II}] A_p \quad ,[\text{kg/s m}],$$

където: A_p е лицето на свободната повърхност, а β се нарича коефициент на масообмен.

Съществуват множество емпирични зависимости за определяне на топлинните загуби от излъхване. Тук е предложена зависимост, която дава удовлетворителни резултати в доста широк диапазон на изменение на параметрите на водата в басейна и въздуха в околната среда. Тя е проверена с доста експериментални резултати описани в литературните източници и дава добро съответствие с наблюденията от съществуващи инсталации за затопляне на вода за плувни басейни в България. Общите топлинни загуби от изпарение се определят по емпиричната формула:

$$Q_{\text{evap}} = 0,0775 \cdot A_{\text{pool}} \cdot \left(1 + \frac{v_{\text{air}}}{1,5} \right) \cdot \left(631 \cdot e^{\frac{T_w}{15,5}} - \frac{H_{\text{air}}}{100} \cdot 631 \cdot e^{\frac{T_{\text{air}}}{15,5}} \right)$$

Загуби през стените на басейна

Топлинният трансфер водещ до загуби от дъното и стените на басейна зависят от температурата и вида на почвата, дълбочината на басейна, термичната му изолация. Той се задава със следното емпирично уравнение:

$$Q_{\text{wall}} = c + d \cdot \frac{S_{\text{pool}}}{A_{\text{pool}}} \quad , [\text{W}],$$

където:

c и d - емпирични параметри, зависещи от геометрията и изолацията на басейна;

S_{pool} - периметър на басейна, m ;

Параметрите c и d задават загубите от стените и дъното:

$$c = c_1 \frac{K_D (T_w - T_D)}{Z}$$

$$d = c_2 K_D (T_w - T_D)$$

като c_1 и c_2 са константи, задаващи влиянието на засенчването, например: за басейн с наклонени стени $c_1=0,99$, $c_2=0,9$;

Z – дълбочината на басейна; $[m]$

T_D – температура близо до стените на басейна; $[K]$

K_D – коефициент на топлопроводност. $[W/m^2K]$

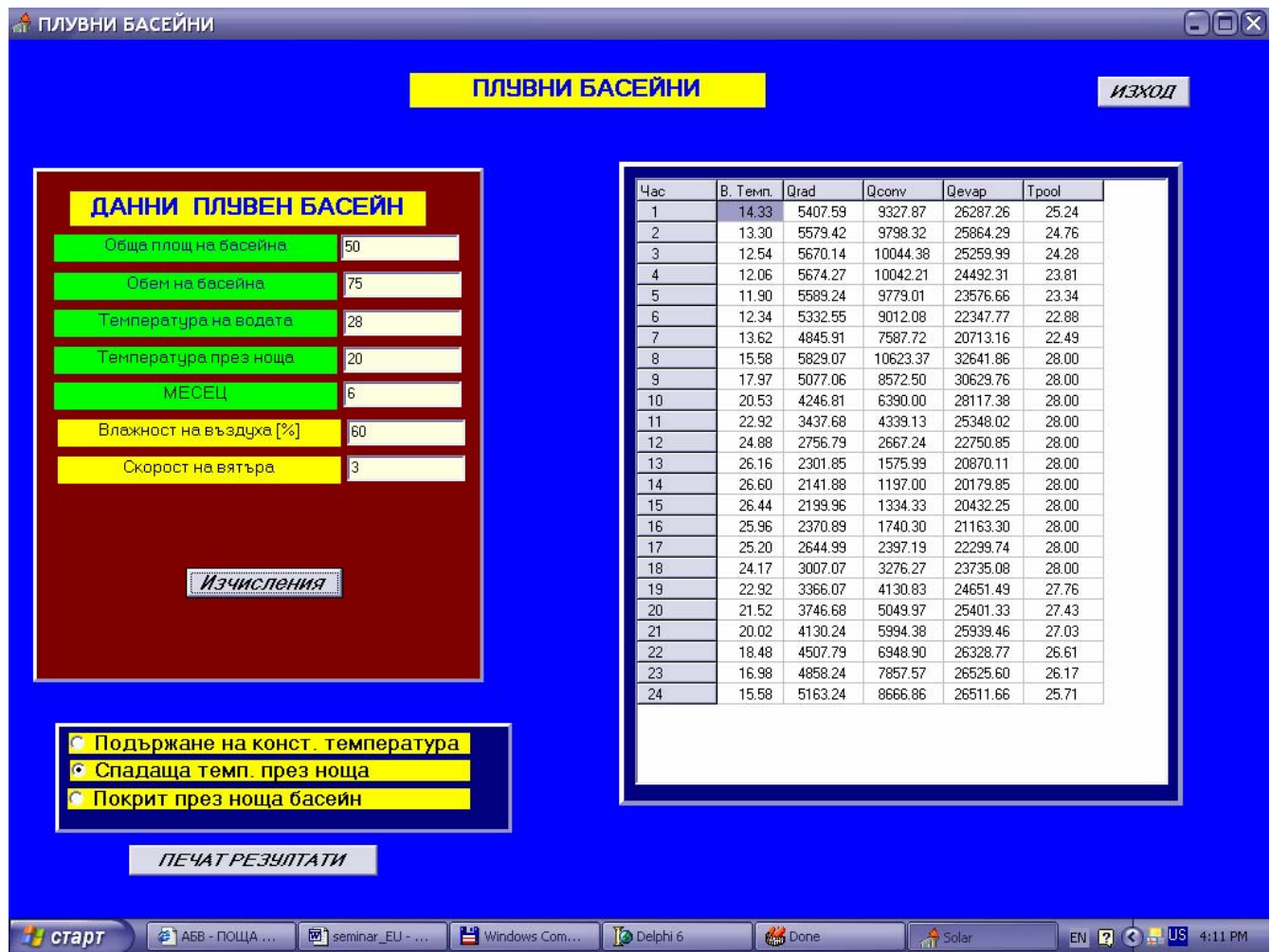
ЕНЕРГИЕН БАЛАНС НА БАСЕЙНА

Тъй като басейнът се използва нормално през деня, необходимо е да се контролира дневния ход на температурата T_{BD} , която се различава от средноденонощната температура. През времето, когато басейнът не се използва, той продължава да обменя енергия с околната среда и да се понижава температурата на водата. Топлинните загуби през това време зависят от температурата и влажността на околния въздух, скоростта на вятъра, прозрачността на атмосферата и други. За да се определят топлинните загуби и понижението на температурата на водата е необходимо да се извършват симулационни изчисления с отчитане на изменението на

температурата на въздуха, слънчевата радиация, скоростта на вятъра. Температурата на водата в басейна се определя от топлоакумулационните характеристики на водата и топлинните загуби. За намаляване на загубите в някои случаи се предвижда през часовете, когато не се използва басейна, водната повърхност да се покрива с прозрачна или черна материя (например полиетиленово фолио). През тези часове се изключват загубите от излъхване и уравнението за моментния енергиен баланс приема вида:

$$Q_{pool} = Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{wall} \quad , [W/m^2] ,$$

На основата на представения модел на топло-масообменните процеси в открити плувни басейни е разработена програма за симулационни изчисления на топлинния баланс на открити плувни басейни. Входни данни за програмата са размерите на басейна (обем и открита площ) и климатични характеристики за района в който се разглежда басейна (фиг.2). Климатичните данни се отнасят за ‘типичен’ ден от даден месец и задават денонощните изменения на температурата на въздуха, влажността, слънчевата радиация, скоростта на въздуха.



Фиг.2. Програмна реализация на модел на слънчев басейн.

В табл.1 и 2 са показани някои резултати, получени по описания по-горе модел за топлинно оразмеряване на слънчево загрявани плувни басейни с програмна система “SOLAR” разработена в катедра “Физика” в ЮЗУ - гр. Благоевград. В табл.1 е показано денонощното изменение на компонентите на енергийния баланс при подържане на постоянна температура на водата в басейна. Данните са за басейн с открита площ 50 м² и обем 75 м³, а климатичните данни са за ‘типичен’ ден от месец Юни за района на гр. Благоевград. В таблица 2 са дадени същите компоненти, но за покрит през нощта басейн.

Таблица 1. Денонощен топлинен баланс на басейн (открит)– м. Юни, гр. Благоевград

| ! час ! | ! Външна ! | ! Заг. рад. ! | ! Конвекция ! | ! Излъхване ! | ! Сл. радиация ! | ! Баланс ! |
|---------|------------|---------------|---------------|---------------|------------------|------------|
| ! - ! | ! темп. ! | ! [W] ! | ! [W] ! | ! [W] ! | ! [W] ! | ! [W] ! |
| ! 1! | ! 14.3 ! | ! 4990 ! | ! 8071 ! | ! 22905 ! | ! 0 ! | ! 35966! |
| ! 2! | ! 13.3 ! | ! 5180 ! | ! 8592 ! | ! 22710 ! | ! 0 ! | ! 36482! |
| ! 3! | ! 12.5 ! | ! 5288 ! | ! 8885 ! | ! 22317 ! | ! 0 ! | ! 36491! |
| ! 4! | ! 12.1 ! | ! 5309 ! | ! 8928 ! | ! 21744 ! | ! 0 ! | ! 35981! |
| ! 5! | ! 11.9 ! | ! 5239 ! | ! 8707 ! | ! 21007 ! | ! 0 ! | ! 34953! |
| ! 6! | ! 12.3 ! | ! 4997 ! | ! 7980 ! | ! 19941 ! | ! 3251 ! | ! 29667! |
| ! 7! | ! 13.6 ! | ! 4524 ! | ! 6593 ! | ! 18449 ! | ! 9023 ! | ! 20542! |
| ! 8! | ! 15.6 ! | ! 5246 ! | ! 8913 ! | ! 27235 ! | ! 16777 ! | ! 24618! |
| ! 9! | ! 18.0 ! | ! 4494 ! | ! 6862 ! | ! 25223 ! | ! 22628 ! | ! 13952! |
| ! 10! | ! 20.5 ! | ! 3664 ! | ! 4680 ! | ! 22711 ! | ! 26065 ! | ! 4989! |
| ! 11! | ! 22.9 ! | ! 2855 ! | ! 2629 ! | ! 19941 ! | ! 28186 ! | ! -2761! |
| ! 12! | ! 24.9 ! | ! 2174 ! | ! 957 ! | ! 17344 ! | ! 29241 ! | ! -8765! |
| ! 13! | ! 26.2 ! | ! 1719 ! | ! -134 ! | ! 15463 ! | ! 28112 ! | ! -11063! |
| ! 14! | ! 26.6 ! | ! 1559 ! | ! -513 ! | ! 14773 ! | ! 25284 ! | ! -9465! |
| ! 15! | ! 26.4 ! | ! 1617 ! | ! -376 ! | ! 15026 ! | ! 22809 ! | ! -6542! |
| ! 16! | ! 26.0 ! | ! 1788 ! | ! 30 ! | ! 15757 ! | ! 19209 ! | ! -1634! |
| ! 17! | ! 25.2 ! | ! 2062 ! | ! 687 ! | ! 16893 ! | ! 14098 ! | ! 5545! |
| ! 18! | ! 24.2 ! | ! 2424 ! | ! 1566 ! | ! 18328 ! | ! 9107 ! | ! 13212! |
| ! 19! | ! 22.9 ! | ! 2811 ! | ! 2498 ! | ! 19553 ! | ! 3935 ! | ! 20927! |
| ! 20! | ! 21.5 ! | ! 3217 ! | ! 3489 ! | ! 20619 ! | ! 0 ! | ! 27326! |
| ! 21! | ! 20.0 ! | ! 3626 ! | ! 4502 ! | ! 21472 ! | ! 0 ! | ! 29600! |
| ! 22! | ! 18.5 ! | ! 4027 ! | ! 5521 ! | ! 22158 ! | ! 0 ! | ! 31706! |
| ! 23! | ! 17.0 ! | ! 4400 ! | ! 6490 ! | ! 22635 ! | ! 0 ! | ! 33525! |
| ! 24! | ! 15.6 ! | ! 4726 ! | ! 7356 ! | ! 22884 ! | ! 0 ! | ! 34966! |

Таблица 2. Денонощен топлинен баланс на басейн (покрит) – м. Юни, гр. Благоевград

| ! час ! | ! Външна ! | ! Заг. рад. ! | ! Конвекция ! | ! Излъхване ! | ! Сл. радиация ! | ! Баланс ! |
|---------|------------|---------------|---------------|---------------|------------------|------------|
| ! - ! | ! темп. ! | ! [W] ! | ! [W] ! | ! [W] ! | ! [W] ! | ! [W] ! |
| ! 1! | ! 14.3 ! | ! 5405 ! | ! 9319 ! | ! 0 ! | ! 0 ! | ! 14723! |
| ! 2! | ! 13.3 ! | ! 5664 ! | ! 10051 ! | ! 0 ! | ! 0 ! | ! 15715! |
| ! 3! | ! 12.5 ! | ! 5839 ! | ! 10551 ! | ! 0 ! | ! 0 ! | ! 16390! |
| ! 4! | ! 12.1 ! | ! 5924 ! | ! 10794 ! | ! 0 ! | ! 0 ! | ! 16718! |
| ! 5! | ! 11.9 ! | ! 5915 ! | ! 10765 ! | ! 0 ! | ! 0 ! | ! 16680! |
| ! 6! | ! 12.3 ! | ! 5730 ! | ! 10220 ! | ! 0 ! | ! 3251 ! | ! 12699! |
| ! 7! | ! 13.6 ! | ! 5310 ! | ! 9002 ! | ! 0 ! | ! 9023 ! | ! 5289! |
| ! 8! | ! 15.6 ! | ! 5246 ! | ! 8913 ! | ! 0 ! | ! 16777 ! | ! -2617! |
| ! 9! | ! 18.0 ! | ! 4494 ! | ! 6862 ! | ! 25223 ! | ! 22628 ! | ! 13952! |
| ! 10! | ! 20.5 ! | ! 3664 ! | ! 4680 ! | ! 22711 ! | ! 26065 ! | ! 4989! |
| ! 11! | ! 22.9 ! | ! 2855 ! | ! 2629 ! | ! 19941 ! | ! 28186 ! | ! -2761! |
| ! 12! | ! 24.9 ! | ! 2174 ! | ! 957 ! | ! 17344 ! | ! 29241 ! | ! -8765! |
| ! 13! | ! 26.2 ! | ! 1719 ! | ! -134 ! | ! 15463 ! | ! 28112 ! | ! -11063! |
| ! 14! | ! 26.6 ! | ! 1559 ! | ! -513 ! | ! 14773 ! | ! 25284 ! | ! -9465! |
| ! 15! | ! 26.4 ! | ! 1617 ! | ! -376 ! | ! 15026 ! | ! 22809 ! | ! -6542! |
| ! 16! | ! 26.0 ! | ! 1788 ! | ! 30 ! | ! 15757 ! | ! 19209 ! | ! -1634! |
| ! 17! | ! 25.2 ! | ! 2062 ! | ! 687 ! | ! 16893 ! | ! 14098 ! | ! 5545! |
| ! 18! | ! 24.2 ! | ! 2424 ! | ! 1566 ! | ! 18328 ! | ! 9107 ! | ! 13212! |
| ! 19! | ! 22.9 ! | ! 2811 ! | ! 2498 ! | ! 0 ! | ! 3935 ! | ! 1373! |
| ! 20! | ! 21.5 ! | ! 3283 ! | ! 3684 ! | ! 0 ! | ! 0 ! | ! 6967! |
| ! 21! | ! 20.0 ! | ! 3759 ! | ! 4900 ! | ! 0 ! | ! 0 ! | ! 8659! |
| ! 22! | ! 18.5 ! | ! 4230 ! | ! 6127 ! | ! 0 ! | ! 0 ! | ! 10357! |
| ! 23! | ! 17.0 ! | ! 4673 ! | ! 7309 ! | ! 0 ! | ! 0 ! | ! 11983! |
| ! 24! | ! 15.6 ! | ! 5070 ! | ! 8390 ! | ! 0 ! | ! 0 ! | ! 13460! |

Анализът на резултатите от първата таблици показва, че падналата слънчева радиация компенсира едва 38% от общите денонощни топлинни загуби, които са в размер на $Q =$

687 [kWh/ден]. Потискането на загубите от излъхване с покриване през периода когато басейна не се използва води до чувствително подобряване на енергийния баланс. Това покритие трябва да е добре поставено за да се избегнат водните джобове на повърхността, които намаляват дори анулират ефективността му. При басейн покрит през нощните часове топлинните загуби са 403 [kWh/ден], а слънчевата радиация компенсира 64% от тези загуби. Не бива да се забравя и влиянието на вятара, който също може да увеличи топлинните загуби, което налага да се осигури защита от него чрез ветрови заграждения, например дървета, ветрови прагове и др. около басейна. Както се вижда от така описаните слънчеви открити басейни те са едно от най-ефективните съоръжения, ползващи изцяло слънчева енергия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Използването на слънчевата енергия за загряване на водата във водни басейни се явява едно перспективно направление за намаляване на използването на конвенционални енергини ресурси (течни и твърди горива). Както се вижда от направения анализ на топлинните процеси в слънчеви открити басейни те са ефективно съоръжение, ползващи изцяло слънчева енергия.

Плувните басейни изискват невисоки температури на загряване на водата, което предполага висока ефективност на слънчевите системи използвани за тази цел. При тях отпада необходимостта от специален акумулатор на топлинна енергия, защото самият басейн изпълнява много ефективно тази роля.

Производството на топла вода чрез слънчеви басейни със солов разтвор са нова технология за използване на възобновяема енергия на Слънцето. Те не са изучени в достатъчна степен, но разгледания модел за топлинен анализ може да се приложи и при тях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Amit Kumar and V. V. N. Kishore. CONSTRUCTION AND OPERATIONAL EXPERIENCE OF A 6000 m² SOLAR POND AT KUTCH, INDIA. Solar Energy, Vol.65, No.4, pp. 237-249, 1999
2. Спасов К., С. Щраков. "Определяне на колекторната повърхност на открити слънчево загрявани басейни.", Енергетика, кн. 12, 1982 г.
3. Волфганг П. "Слънчево електричество", Изд. "Техника", С., 1985 г., Юнеско, Париж.
4. D. Subhakar and S. Srinivasa Murthy "Saturated solar ponds: 1. Simulation procedure", Solar Energy, Vol.50, No.3, pp. 275-282, 1993
5. Клечек Йосип "Слънчева енергия и хелиоенергетика", Изд. "Наука и изкуство", С., 1984г.
6. D. Subhakar and S. Srinivasa Murthy "Saturated solar ponds: 2. Parametric studies", Solar Energy, Vol. 50 No. 4, pp. 307-317, 1993