Изследване на нестационарните топло- и хидродинамични полета в акумулатори на топлинна енергия

Нина Пенкова, Николай Харизанов, Лилиана Зашкова

Съставен е математичен модел за симулационно моделиране на нестационарните топло- и хидродинамични полета във воден акумулатор на топлинна енергия, интегриран в промишлена оранжерийна инсталация. Чрез него ще бъдат проведени серии от моделни изследвания с цел повишаване на енергийната и технологичната ефективност на акумулатора и свързаните с него енергийни източници и консуматори.

Investigation of the transient thermal and fluid flow fields in thermal energy storage tanks

Nina Penkova, Nickolay Harryzanov, Liliana Zashcova

A mathematical model for numerical simulation of the transient thermal and fluid flow fields in a thermal energy water storage tank, integrated in a conservatory installation is composed. Planed investigations based on the model will be implemented to increase the energy and technology efficiency of the thermal accumulator and connected with it energy sources and consummators.

1. Въведение

Основна задача на акумулирането на топлинна енергия е преодоляването на времевите несъответствия при получаването и консумирането й. Използването на топлинни акумулатори осигурява непрекъснат резерв на енергия чрез буферно акумулиране на променливите топлинни товари, което води до рационално използване и регулиране на топлинните мощности [1,2]. Тези предимства са довели до интегриране на акумулаторите на топлинна енергия в:

- промишлени системи с цел оползотворяването на отпадна топлинна енергия;
- в системи за отопление и кондициониране на въздуха в сгради;
- в когенерационни централи и инсталации;
- в транспортни средства;
- в системи за нагряване на вода за битови нужди.

Топлинните акумулатори се състоят най-общо от акумулиращ съд (обикновено топлинно изолиран), акумулираща среда и съоръжения за зареждане, и разреждане. Топлоакумулиращата среда може да бъде твърда, течна или газообразна, с или без фазов преход. В практиката често за целта се използва водата, тъй като тя има висок специфичен топлинен капацитет, евтина е и е достъпна в големи количества.

При вертикалните акумулатори с течни топлоакумулиращи среди вследствие на разликата в плътността на флуида, дължаща се на различните температури в съда възниква температурно разслояване (стратификация). Температурната стратификация е от значение за:

- енергийната ефективност на инсталациите: температурното стратифициране води до намаляване на топлинните загуби от топлоакумулиращата маса към околната среда и до редуциране енергията за зареждане на акумулатора;
- безпроблемната работа на инсталациите в системата.

От литературата са известни изследвания и методи за оразмеряване на топлинните акумулатори, търсещи оптимизиране на геометрията и конструкцията им с цел запазване

температурната стратификация за продължителни периоди от време. Направения преглед на научните постижения [3,4] в тази област показват, че няма достатъчно проведени изследвания на топло- и хидродинамичните полета, които се формират при нестационарните процеси на зареждане и разреждане на акумулаторите.

В настоящата работа е изложен един подход за изследване на нестационарните процеси и полета в топлинни акумулатори чрез математично моделиране и компютърна симулация [3,4]. Моделните изследвания дават възможност да бъде прогнозирано разпределението на температурните и скоростните полета в топлинните акумулатори при различни конструкции и термодинамични условия на работа, което не може да бъде постигнато с тривиалните изчислителни методи.

Този подход ще бъде използван за определяне на границите на вариране на режимни параметри на един работещ в промишлена система акумулатор от гледна точка на предназначението му и с цел повишаване на енергийната и технологичната ефективност на свързаните с него енергийни източници и консуматори.

2. Обект на изследване

Обект на настоящето изследване е един воден акумулатор, който е част от схемата на работеща у нас оранжерийна инсталация, с източници на енергия една когенерационна система и шест водогрейни отоплителни котли (фиг.1).

Когенераторът, работещ с гориво природен газ е с инсталирани електрическа и топлинна мощност съответно 1850 kW и 1820 kW. За да се гарантира непрекъснатата му експлоатация когенераторът е свързан с воден топлинен акумулатор.

Акумулаторът се зарежда с топлинна енергия, отделена при охлаждане на маслото на двигателя на когенератора. Температурата на охлаждащата маслото вода не бива да превишава 62-63°C (водата в долния край на топлинния акумулатор трябва да бъде с температура максимум 60-62°C). При превишаване на тези стойности автоматиката блокира работата на когенератора.

Допълнително топлинна енергия в акумулатора се подава от вода, охлаждаща изходящите газове в топлообменник - утилизатор. По този начин се повишава к.п.д. на когенератора.

Акумулаторът се разрежда като от горната му част се подава вода посредством циркулационни помпи към колектори, свързани с отоплителната инсталация. При необходимост водата се дозагрява във водогрейните котли. Охладената в отоплителната инсталация вода постъпва в долния край на резервоара.

Резервоарът е цилиндричен, вертикален, с височина 10,4 метра, широчина 11,3 метра и куполен покрив с височина 1,5 м. Изграден е от стоманени листове - в долната половина с дебелина 6 мм, а в горната с дебелина 4 мм. Нивото на водата в него се поддържа 9м. Стените и купола са топлоизолирани с външна топлинна изолация от 100 мм. минерална вата и обшивка от поцинкована ламарина.

Резервоарът стои свободно върху стоманено-бетонен фундамент. В горния му край има два входа (от утилизатора и от топлообменика за охлаждане на маслото), през които се подава вода с температура 85°C и дебит съответно 90 м^3/час (86,86 т/час) и 150 м^3/час (144,77 т/час). Срещу входящите тръбопроводи се намират 2 изходящи (към колекторите, свързани с котлите). В долния край на резервоара са разположени два входа, всеки с дебит 100 тона/час температура на водата 45°C и срещуположно на тях два изхода – към когенератора и към утилизатора. Предвидено е (но все още не е изпълнено) в газовото пространство над водата да се подържа надналягане 0,01 MPa и инертна среда с по-висока концентрация на азот в сравнение с атмосферния въздух за предотвратяване на корозията.

3. Концепция за симулационен модел в среда ANSYS

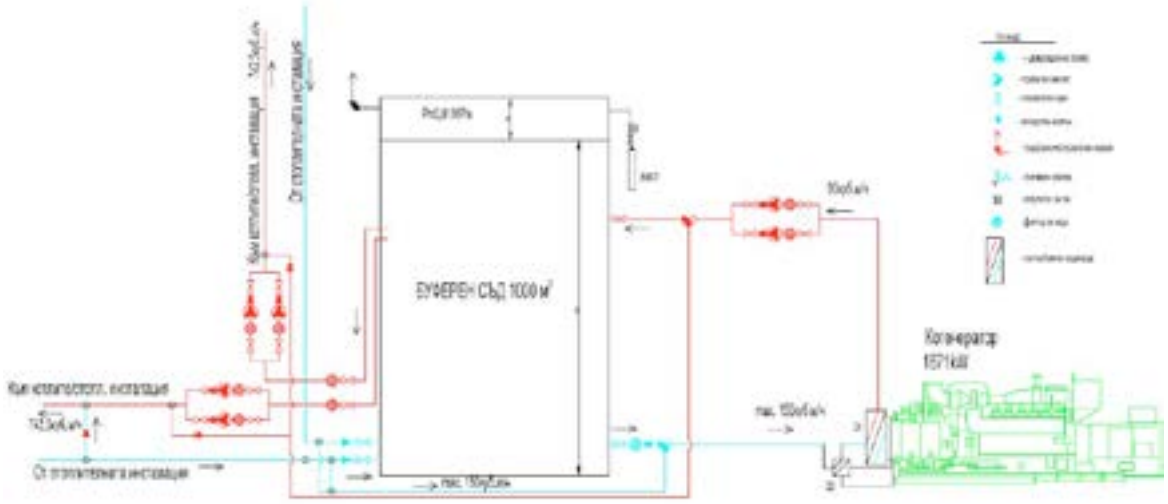
Подробна информация за нестационарните топло- и хидродинамични полета в топлинния акумулатор може да бъде получена чрез числено решаване на долуописаната

система уравнения по метод на крайните елементи за дискретизираното пространство на резервоара. Флуидната среда е двуфазна (въздух и вода), разделена от свободна повърхност. Излъхването на водата от повърхността се пренебрегва, тъй като то влияе несъществено върху температурното разпределение в течната среда.

Формирането на свободната повърхност се изчислява чрез volume of fluid (VOF) алгоритъм. Формата и местоположението на свободната повърхност се задават чрез обемни фракции на елементите (value of the volume fraction (VFRC)), частично пълни с течност. За пълните с течност елементи VFRC е единица, а при празните (газовата среда) - нула. Стойност между нула и единица индикира, че съответният елемент е частично пълен и се пресича от свободната повърхност.

За изчисляване на формирането на свободната повърхност е необходимо да се отчете и повърхностното напрежение на водата, граничеща с въздушен слой.

Естественото движение и разпределението на флуидите в пространството на резервоара се изчислява на базата на разлика в плътностите (ρ-ρ_r) при референтна плътност на въздуха ρ_r=1,2 kg/m^3.



Фиг. 1: Схема на свързване на акумулатора на топлина

3.1. Система уравнения

За двете среди, разделени от свободна повърхност (вода и въздух) се решава едновременно долуописаната с-ма уравнения по метод на крайните елементи

✓ *Уравнение на непрекъснатостта:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau}+\frac{\partial(\rho \overline{V}_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho \overline{V}_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho \overline{V}_z)}{\partial z}=0 \qquad (1)$$

✓ *Закон за запазване на енергията при несвиваеми флуиди:*

$$\frac{\partial}{\partial \tau}\left(\rho.c_p.T\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(\rho.\overline{V}_x c_p.T\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\rho.\overline{V}_y c_p.T\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\rho.\overline{V}_z c_p.T\right)= \frac{\partial}{\partial x}\left(K_e.\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_e.\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_e.\frac{\partial T}{\partial z}\right) \qquad (2)$$

където $K_e = K + K_t$;

✓ *Закон за запазване количеството на движението за несвиваеми флуиди* (Рейнолдсовите уравнения за турбулентните движения):

$$\frac{\partial \rho.\overline{V}_x}{\partial \tau}+\frac{\partial(\rho.\overline{V}_x.\overline{V}_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho.\overline{V}_y.\overline{V}_x)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho.\overline{V}_z.\overline{V}_x)}{\partial z}=\rho.g_x-\frac{\partial p}{\partial x}+ \\ +\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e\frac{\partial \overline{V}_x}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e\frac{\partial \overline{V}_x}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e\frac{\partial \overline{V}_x}{\partial z}\right) \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho.\overline{V}_y}{\partial \tau}+\frac{\partial(\rho.\overline{V}_x.\overline{V}_y)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho.\overline{V}_y.\overline{V}_y)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho.\overline{V}_z.\overline{V}_y)}{\partial z}=\rho.g_y-\frac{\partial p}{\partial y}+ \\ +\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e\frac{\partial \overline{V}_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e\frac{\partial \overline{V}_y}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e\frac{\partial \overline{V}_y}{\partial z}\right) \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho.\overline{V}_z}{\partial \tau}+\frac{\partial(\rho.\overline{V}_x.\overline{V}_z)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho.\overline{V}_y.\overline{V}_z)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho.\overline{V}_z.\overline{V}_z)}{\partial z}=\rho.g_z-\frac{\partial p}{\partial z}+ \\ +\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_e\frac{\partial \overline{V}_z}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_e\frac{\partial \overline{V}_z}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_e\frac{\partial \overline{V}_z}{\partial z}\right) \quad (5)$$

където $\mu_e=\mu+\mu_t$

✓ *Стандартен к-ε модел на турбулентност:*

$$\frac{\partial \rho\kappa}{\partial \tau}+\frac{\partial(\rho.V_x.\kappa)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho.V_y.\kappa)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho.V_z.\kappa)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}.\frac{\partial\kappa}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}g\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}.\frac{\partial\kappa}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k}.\frac{\partial\kappa}{\partial z}\right)+ \\ +\mu_t\Phi-\rho.\varepsilon+\frac{C_4.\beta.\mu_t}{\sigma_t}.\left(g_x.\frac{\partial T}{\partial x}+g_y.\frac{\partial T}{\partial y}+g_z.\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (6)$$

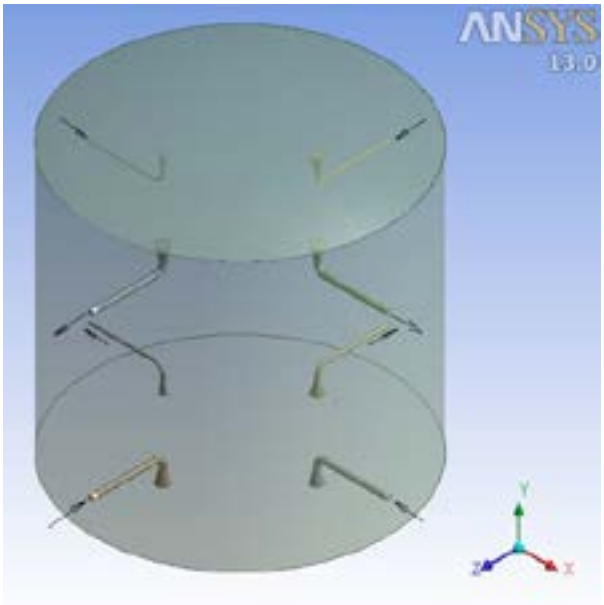
$$\frac{\partial \rho\varepsilon}{\partial \tau}+\frac{\partial(\rho.V_x.\varepsilon)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho.V_y.\varepsilon)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho.V_z.\varepsilon)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}.\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon k}}.\frac{\partial\varepsilon}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}.\frac{\partial\varepsilon}{\partial z}\right)+ \\ +C_{1\varepsilon}\mu_t.\frac{\varepsilon}{\kappa}.\phi-C_2\rho.\frac{\varepsilon^2}{\kappa}+\frac{C_\mu.(1-C_3).\beta.\rho.\kappa}{\sigma_t}.\left(g_x.\frac{\partial T}{\partial x}+g_y.\frac{\partial T}{\partial y}+g_z.\frac{\partial T}{\partial z}\right) \quad (7)$$

където: $\mu_t=\rho.C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$; $K_t=\frac{\mu_t.C_p}{\sigma_t}$

Константите към модела на турбулентност са: C_μ= 0.09; C_1 = 1.44; C_2 = 1.92; σ_k = 1; σ_ε=1.3; σ_t=1, C_3=1; C4=0 и β=0.

За описание на граничния слой се използват метод на пристенните функции, с константи κ=0,41 (Von Karman); C=5,2 и y^+=11,06.

3.2. Условия на еднозначност



Фиг. 2: Геометричен модел

Фиг. 3: 3D мрежа

А) Геометрични условия

Геометричният модел обхваща цялото пространство на резервоара заедно с входовете и изходите на водата (фиг.2). При построяването на последните се пренебрегват металните им стени, които са “тънки” съгласно теорията на топлопренасянето – имат ниско топлинно съпротивление. Изолираната стена на резервоара също може да бъде изключена от геометричния модел като топлообмена през нея се моделира адекватно при задаване на граничните условия.

За да бъде симулиран по метода на крайните елементи спрегнатия топлообмен в акумулатора е необходимо входовете и изходите в течната среда да имат общи граници с нея. Мрежата от крайни елементи е планирана съгласно очакваните градиенти на полетата (фиг. 3).

Б) Физични условия

Таблица 1:

Физични свойства на водата и въздуха

Въздух	Вода
$\rho = 1{,}293.\frac{p}{T}.\frac{273{,}15}{101325}$	$\lg\rho = 2{,}5405 - (1 - T/374{,}15)^{2/7}.\lg 0{,}2740$
$c_p = 955 + 0{,}18.T$	$c_p = 4{,}1868.(0{,}6741 + 2{,}825.10^{-3}T - 8{,}371.10^{-6}.T^2 + 8{,}601.10^{-9}T^3)$
$\lambda = 0{,}02454.\left(\frac{T}{T_o}\right)^{1.5}\left(\frac{T_o + 147{,}7}{T + 147{,}7}\right)$	$\lambda = 4{,}1868.10^{-4}(-916{,}62 + 12{,}547T - 152{,}12.10^{-4}T^2)$
$\mu = 17{,}1.10^{-6}.\left(\frac{T}{T_o}\right)^{1.5}\left(\frac{T_o + 89{,}77}{T + 89{,}77}\right)$	$\lg\mu = -10{,}73 + 1828/T + 1{,}966.10^{-2}T - 14{,}66.10^{-6}T^2$
	$\sigma = 71{,}97[(374{,}15 - t)(349{,}15)]^{0{,}8105}$

В) Начални условия

Началните стойности на компонентите на векторите на скоростта и на налягането се

приемат за нулеви за всеки възел от дискретизираното пространство:

$V_x = V_x\ (x,y,z,0) = 0$

$V_y = V_y\ (x,y,z,0) = 0$

$V_z = V_z\ (x,y,z,0) = 0$

$p = p\ (x,y,z,0)$

Началното температурно поле се приема за равномерно, като стойностите на температурата се определят на базата на квазистационарен режим на работа на акумулатора. В настоящия случай тази стойност е 50 °C:

$T = T\ (x,y,z,0) = 323\ K$

Началните обемни фракции на течната и на газовата част при регулиране на нивото не се изменят при процеса:

Вода: $r_{water}=V_{water}/V_{reservoir}$; $r_{water}=0{,}8059$

Въздух: $r_{air}=V_{air}/V_{reservoir}$; $r_{air}=0{,}1941$

Г) Гранични условия

Таблица 2:

Гранични условия

Граница	Гранично условие
Околни стени и свод на резервоара	*Vx=Vy=Vz=0;* ГУ от III род за моделиране на топлообмена през стените при приемане $T_f=T_{int}$: $\left(K_f \frac{\partial t}{\partial n}\right)\Big\|_s = u(t_f - t_0)$ където $u = \frac{1}{\sum_{i=1}^{2}\frac{\delta_i}{K_i} + \frac{1}{h_2}}$.
Дъно	*Vx=Vy=Vz=0;* ГУ от III род за моделиране на топлообмена $T_f=T_{int}$: $\left(K_f \frac{\partial t}{\partial n}\right)\Big\|_s = u(t_f - t_0)$ където: $U = \frac{2.\lambda}{\pi.B' + d_f}.\ln\left(\frac{\pi.B'}{d_f}+1\right)$ при d_f<B' $B' = \frac{A_G}{0{,}5.P}$ - пространствена характеристика на дъното; A_g – площ на земната основа, m^2; P – периметър, m; $d_f = w + \lambda.(R_{si} + R_f + R_{se})$ - приведена дебелина на дъното; w – дебелина на надземната част на вертикалната стена над нивото на терена, m; λ - коефициент на топлопроводност на земята, λ=2 W/(m.K); R_{si} – съпротивление на топлопредаване на вътрешната повърхност, $R_{si}\approx 0\ m^2.K/W$; R_{se} – съпротивление на топлопредаване на външната повърхност, $R_{se}=0{,}04\ m^2.K/W$; R_f – съпротивление на топлопредаване на дъното: $R_f = \sum_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}$.
Стени на входящите и изходящите участъци	*Vx=Vy=Vz=0;*

Вход и изход на зареждащите и разреждащите и линии извън резервоара	Компоненти на векторите на скоростта, перпендикулярни на входа: $V_n = \frac{\dot{m}}{f.\rho}$ Останалите компоненти на скоростните вектори се приемат за равни на нула. Интензивност на турбулентност 5%. Температури: горен вход 85°C; долен вход 45°C (задават се само на равнините на входа)
Равнина на купола	Разглежда се като отворена граница с налягане *p=0 Pa* ГУ от III род за моделиране на топлообмена при T_f=T_{int}: $\left(K_f \frac{\partial t}{\partial n}\right)\Big\|_s = u(t_f - t_0)$ където $u = \frac{1}{\sum_{i=1}^{2}\frac{\delta_i}{K_i} + \frac{1}{h_2}}$

При спазване на гореописаните условия за моделиране ще бъде проведена симулация при едновременно зареждане и разреждане на топлинния акумулатор до достигане на квазистационарен режим на работа. Получените температурни и скоростни полета в акумулатора ще бъдат използвани като начални за симулиране на различни режими на зареждане и разреждане в зависимост от енергийните потребности.

4. Заключение

Уточнени са математичното описание и концепцията за моделни изследвания на нестационарните полета в топлинния акумулатор, чрез които ще бъдат проведени числени изследвания при различни режими на разреждането му в зависимост от потребностите от топлинна енергия в отоплителната система. Резултатите от тези изследвания ще бъдат използвани за определяне на границите на вариране на дебитите на разреждащите акумулатора водни потоци и на граничните стойности на периодите без разреждане.

Означения

c - спец. топлинен капацитет, [J/(kg.K)]
h - коеф. на топлопредаване чрез конвекция, [W/(m^2.K)]
K - коеф. на топлопроводност, [W/(m.K)]
T - температура, [K]
u - коеф. на топлопреминаване, [W/(m^2.K)]
p - налягане, [Pa]
f - площ [m^2]
$\dot{m}$ - масов дебит, [kg/s]
$g(g_x, g_y, g_z)$ – вектор на земното ускорение, [m/s^2]
$V(V_x, V_y, V_z)$ скорост, [m/s]
κ - турбулентна кинетична енергия, [J/kg]
n - нормала към повърхност [-]
σ - повърхностно напрежение, [mN/m]
ε - скорост на дисипация на турбул. кин. енергия, W/kg, степен на чернота -
μ - динам. вискозитет, [Pa.s]
σ_k, σ_ε - числа на Шмид, съответно за κ и ε; σt – число на Прандтл

ρ – плътност, [kg/m^3]
τ– време, [s]

Участието в настоящата конференция е осъществено с финансовата подкрепа на ОП РЧР, съфинансирана от ЕСФ по проект BG051PO001-3.3.06-0014. Авторът носи цялата отговорност за съдържанието на настоящия материал и при никакви обстоятелства не може да се приеме като официална позиция на Европейския съюз или МОМН

Контакти:
Нина Янкова Пенкова, доц. д-р инж., Химикотехнологичен и Металургичен Университет, 0886 08 44 66, nina_ir@mail.bg
Николай Стефанов Харизанов, инж., Химикотехнологичен и Металургичен Университет, 0898 91 20 67, nickolay.harryzanov@gmail.com
Лилиана Зашкова Стоянова, проф. д-р инж., Химикотехнологичен и Металургичен Университет, 0895 58 99 34

Литература:
1. Калоянов Н.,, Топлообменни апарати. Курс лекции, 2009
2. Бекман Г., Гили П., Акумулатори на топлина, Техника, 1988
3. Campos Celador A., Odriozola M., Sala J.M., Implication of the modeling of stratified hot water storage tanks in the simulation of CHP plants, Energy convention and Management 52 (2011) 3018-3026
4. Antoni Gil, Marc Medrano, Ingrid Martorell, Ana Lar'zaro, Pablo Dolado, Beler'n Zalba, Luisa F. Cabeza, State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation, Part 1 – Concepts, materials and modellization. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 31–55