



ЕНЕРГОМАШИНОСТРОИТЕЛЕН ФАКУЛТЕТ

XVIII Научна конференция с международно участие ЕМФ 2013

ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ - СОФИЯ

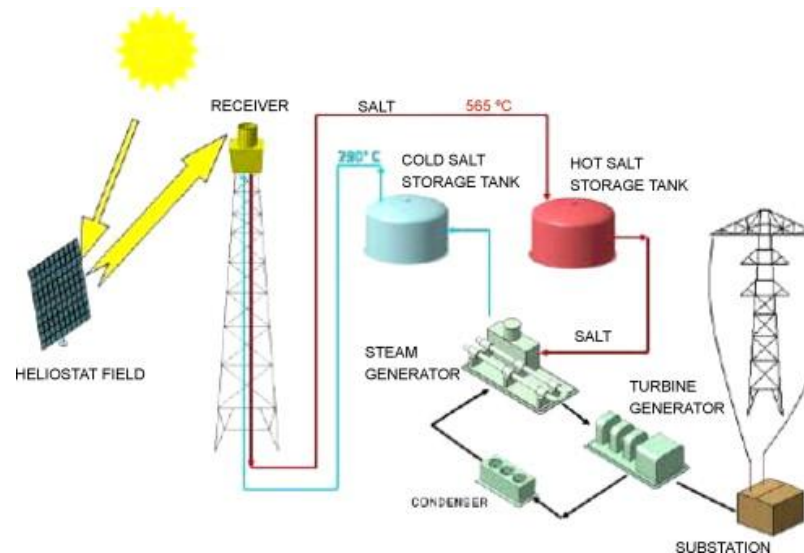
Оптимизиране на температурното стратифициране във водни акумулатори на топлинна енергия

Нина Пенкова, Николай Харизанов, Лилиана Зашкова

Акумулатори на топлина

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

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

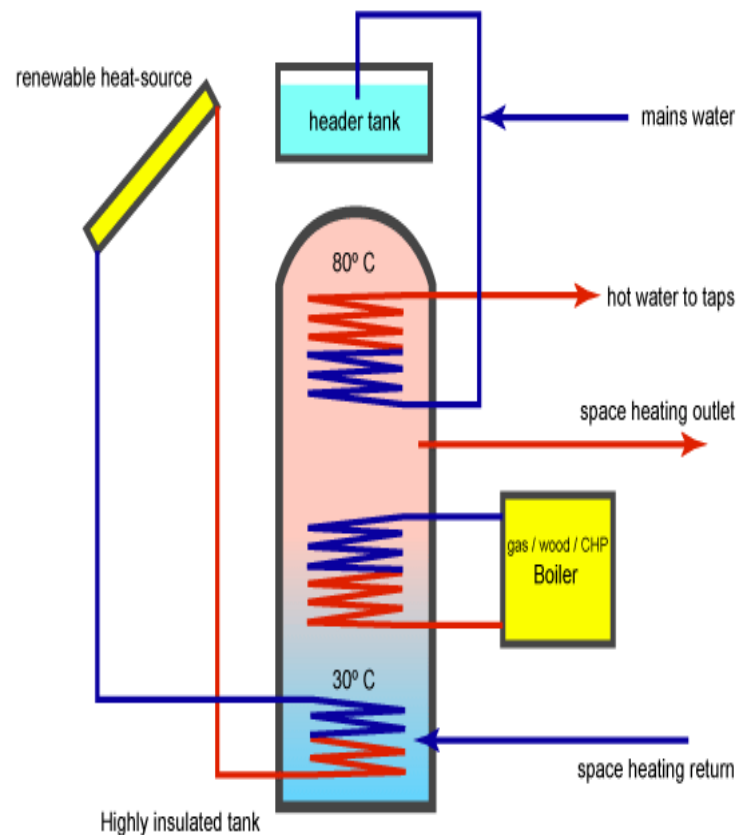


Температурна стратификация

При вертикалните акумулатори с течни топлоакумулиращи среди вследствие на разликата в плътността на флуида 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.



Цел и задачи

- **Цел:** Оптимизиране на температурната стратификация на водни топлоенергийни акумулатори от гледна точка на тяхното предназначение и ефективност на системата, в която са внедрени.
- **Задачи:**
 - 1) Съставяне на математичен модел за компютърна симулация на нестационарните топло- и хидродинамични процеси и полета във водни акумулатори на топлинна енергия.
 - 2) Валидиране и верифициране на модела.
 - 3) Симулиране на температурни и скоростни полета при различни конструкции и термодинамични условия на работа на акумулатора.
 - 4) Анализ на получените резултати и формулиране на препоръки за:
 - оптимизиране на геометрията и конструкцията на проекто-акумулатори на топлинна енергия;
 - границите на вариране на параметрите на зареждащите и разреждащите линии при работещ акумулатор на топлина

Обект на изследване

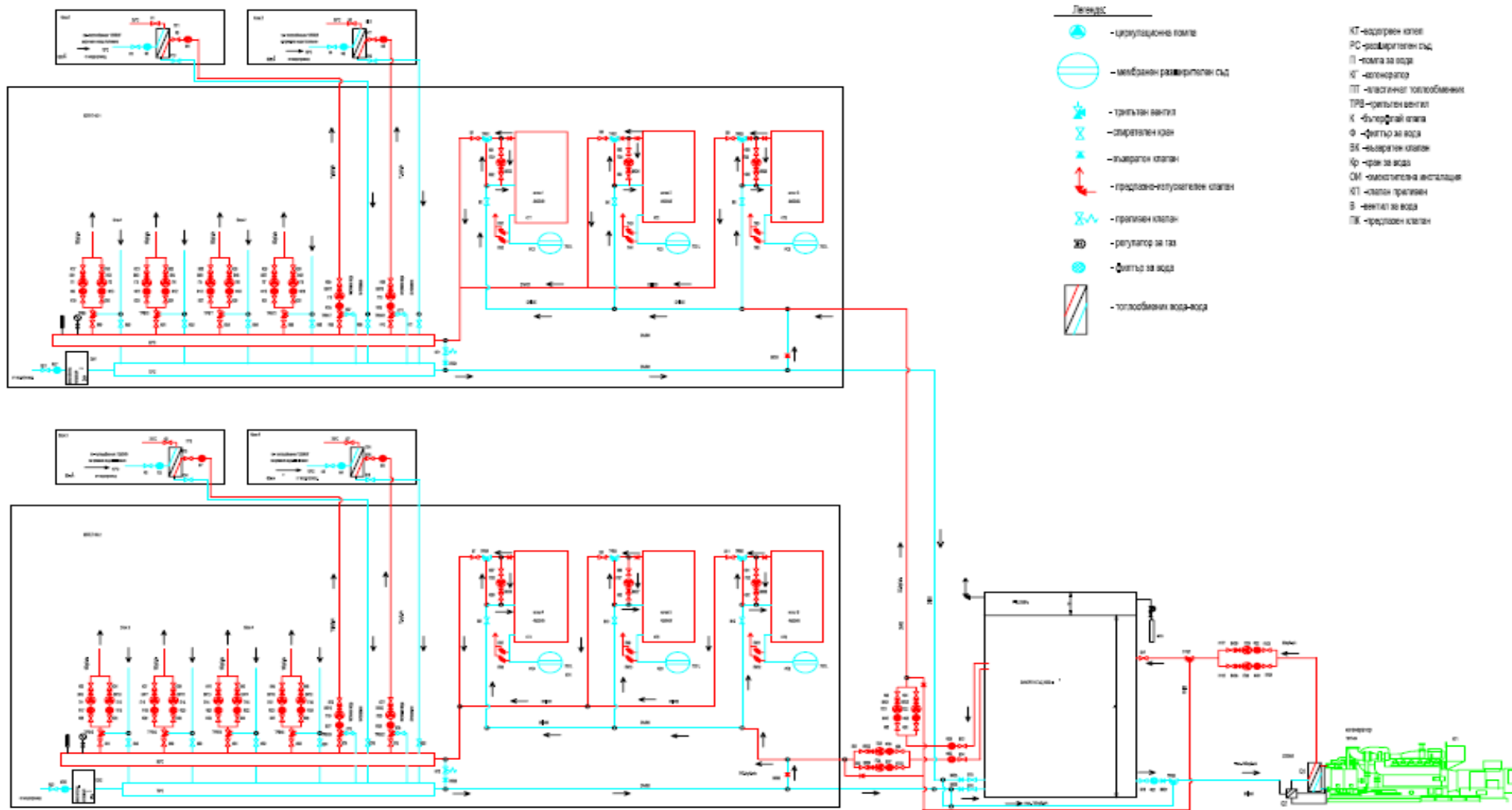


Схема на отоплителната и когенерационната инсталация, и свързвания с тях акумулатор на топлинна енергия

Обект на изследване

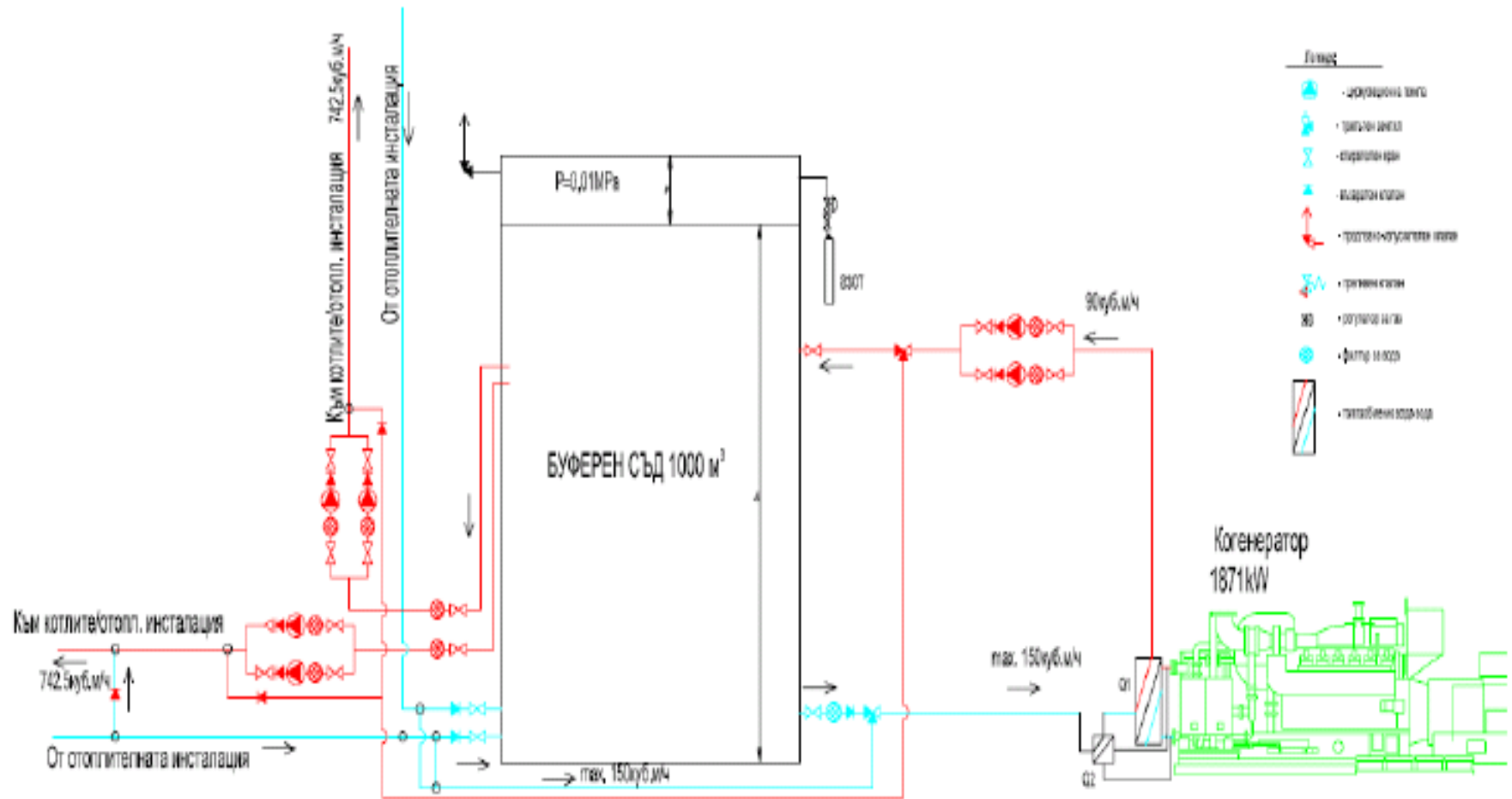


Схема на когенерационната инсталация и свързвания с тях акумулатор на топлинна енергия

Математичен модел

- 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.
- Свободното движение и разпределението на флуидите в пространството на резервоара се изчислява на базата на разлика в плътностите ($\rho - \rho_r$) при референтна плътност на въздуха $\rho_r = 1,2 \text{ kg/m}^3$.

Система уравнения:

- Уравнение на непрекъснатостта:*

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_z)}{\partial z} = 0$$

- За запазване на енергията при несвиваеми флуиди:*

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot c_p \cdot T) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho \bar{V}_x c_p \cdot T) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho \bar{V}_y c_p \cdot T) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho \bar{V}_z c_p \cdot T)$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(K_e \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_e \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_e \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

Система уравнения

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

$$\frac{\partial \rho \bar{V}_x}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_x \bar{V}_x)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_y \bar{V}_x)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_z \bar{V}_x)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_x}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{V}_y}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_x \bar{V}_y)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_y \bar{V}_y)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_z \bar{V}_y)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_y}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{V}_z}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_x \bar{V}_z)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_y \bar{V}_z)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho \bar{V}_z \bar{V}_z)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_e \frac{\partial \bar{V}_z}{\partial z} \right) \quad , \text{ където } \mu_e = \mu + \mu_t$$

Система уравнения

- Стандартен k - ε модел на турбулентност:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial [\rho V_x k]}{\partial x} + \frac{\partial [\rho V_y k]}{\partial y} + \frac{\partial [\rho V_z k]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial z} \right) +$$

$$+ \mu_t \Phi - \rho \varepsilon + \frac{C_4 \beta \mu_t}{\sigma_t} \left(g_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial \tau} + \frac{\partial [\rho V_x \varepsilon]}{\partial x} + \frac{\partial [\rho V_y \varepsilon]}{\partial y} + \frac{\partial [\rho V_z \varepsilon]}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) +$$

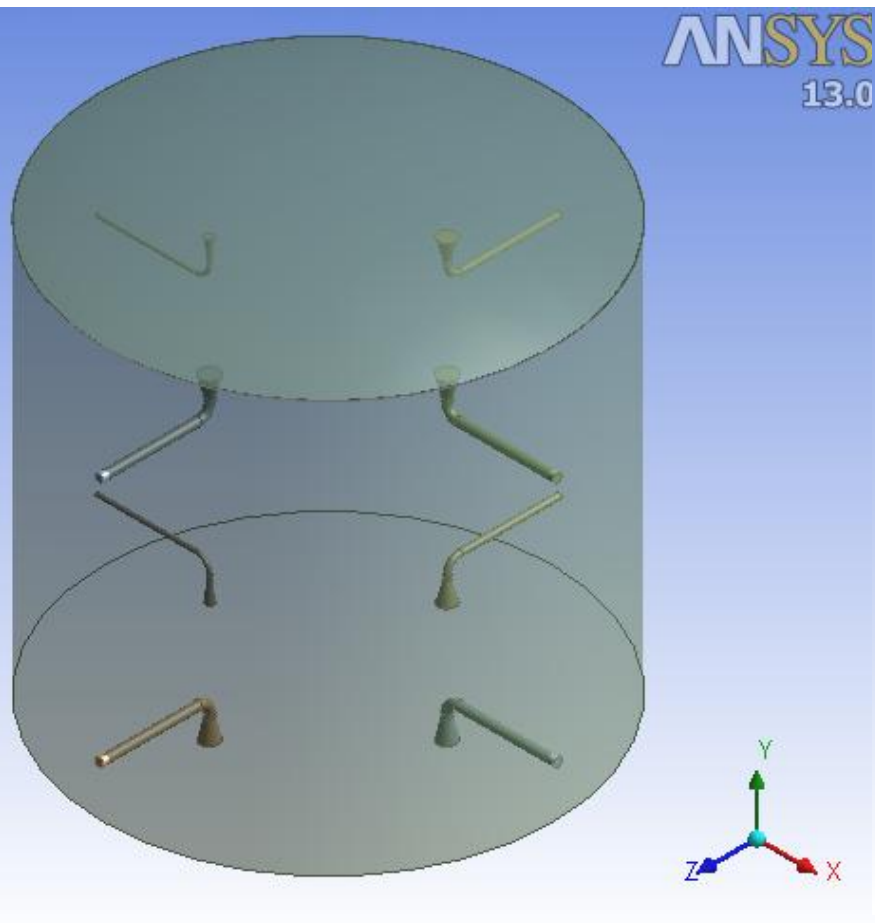
$$+ C_{1\varepsilon} \mu_t \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot \phi - C_2 \rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{C_\mu \cdot (1 - C_3) \cdot \beta \cdot \rho \cdot k}{\sigma_t} \cdot \left(g_x \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + g_y \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + g_z \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

, където $\mu_t = \rho \cdot C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$ и $K_t = \frac{\mu_t C_p}{\sigma_t}$

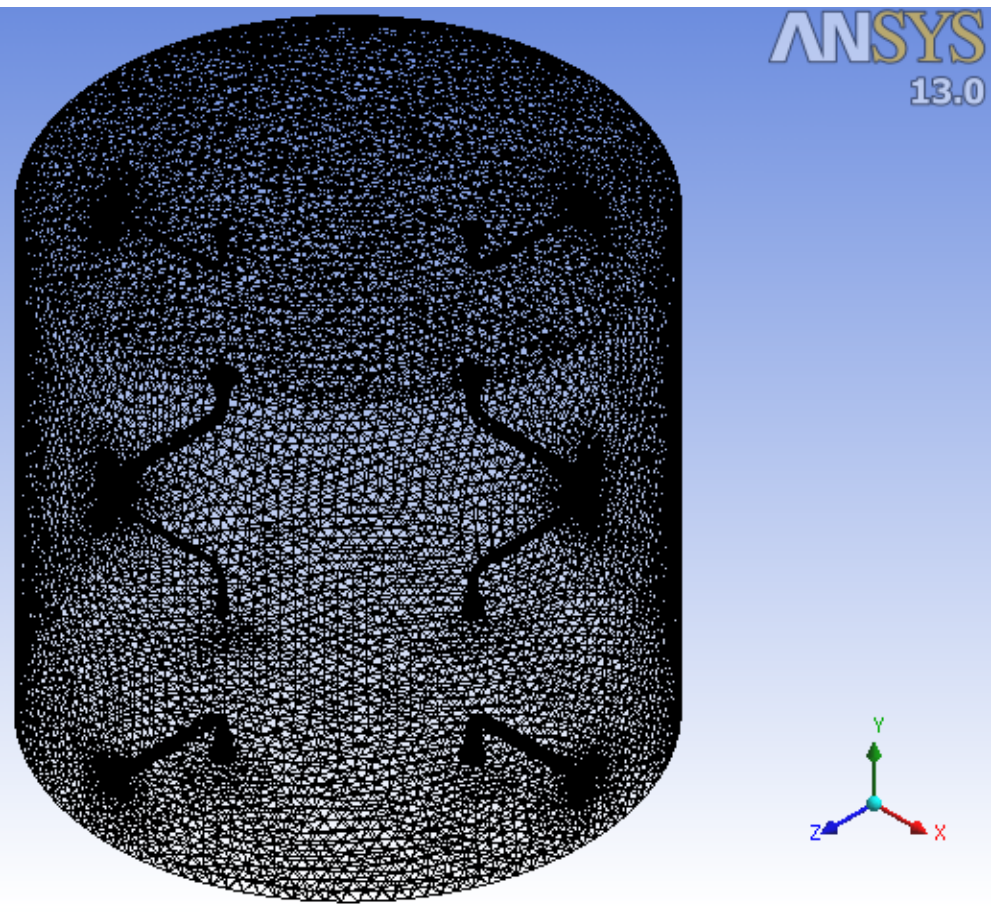
Константите към модела на турбулентност са: $C_\mu = 0.09$; $C_1 = 1.44$; $C_2 = 1.92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$; $\sigma_t = 1$, $\sigma_3 = 1$; $C_4 = 0$ и $\beta = 0$.

За описание на граничния слой се използват метод на пристенните функции, с константи $\kappa = 0.41$ (Von Karman); $C = 5.2$ и $y^+ = 11.06$.

Условия на еднозначност



Геометричен модел



Мрежа от крайни елементи

Начални условия

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: $T = T(x, y, z, 0) = 323 \text{ K}$

Начални обемни фракции на течната и на газовата част:

Обемна част на водата: $r_{\text{water}} = V_{\text{water}} / V_{\text{reservoir}}$; $r_{\text{water}} = 0,8059$

Обемна част на въздуха: $r_{\text{air}} = V_{\text{air}} / V_{\text{reservoir}}$; $r_{\text{air}} = 0,1941$

Начални стойности на компонентите на векторите на скоростта и налягането:

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

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

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

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

Физични условия

Въздух	Вода
$\rho = 1,293 \cdot \frac{p}{T} \cdot \frac{273,15}{101325}$	$\lg \rho = 2,5405 - (1 - T/374,15)^{2/7} \cdot \lg 0,2740$
$c_p = 955 + 0,18 \cdot T$	$c_p = 4,1868 \cdot (0,6741 + 2,825 \cdot 10^{-3} T - 8,371 \cdot 10^{-4} T^2 + 8 \cdot 10^{-6} T^3)$
$\lambda = 0,02454 \cdot \left(\frac{T}{T_o}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{T_o + 147,7}{T + 147,7}\right)$	$\lambda = 4,1868 \cdot 10^{-4} \cdot (-916,62 + 12,547 T - 152,12 \cdot 10^{-4} T^2)$
$\mu = 17,1 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{T}{T_o}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{T_o + 89,77}{T + 89,77}\right)$	$\lg \mu = -10,73 + 1828 / T + 1,966 \cdot 10^{-2} T - 14,66 \cdot 10^{-6} T^2$
	$\sigma = 71,97 \cdot [(374,15 - t)(349,15)]^{0,3105}$

Гранични условия

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

Гранични условия

Стени на входящите и изходящите участъци	$V_x = V_y = V_z = 0;$
Вход и изход на зареждащите и разреждащите и линии извън резервоара	Компоненти на векторите на скоростта, перпендикулярни на входа: $V_n = \frac{\dot{m}}{f \cdot \rho}$ 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 $p = 0 \text{ Pa}$ ГУ от III род за моделиране на топлообмена при $T_f = T_{int}$: $\left(K_f \frac{\partial t}{\partial n} \right) \Big _f = u(t_f - t_o)$ където $u = \frac{1}{\sum_{i=1}^2 \frac{\delta_i}{K_i} + \frac{1}{h_2}}$

Предстоящи изследвания

- Предложените математичен модел и концепция за моделни изследвания ще бъдат използвани за анализ на нестационарните полета в топлинния акумулатор и за формулиране на препоръки за повишаване на енергийната и технологична ефективност на акумулатора и на свързаните с него енергийни източници и консуматори.
- Авторите на статията изказват своята благодарение към проекта BG 051 PO001-3.3.06-0014, Център по математично моделиране и компютърна симулация

Б л а г о д а р я з а
в н и м а н и е т о !