

ИЗСЛЕДВАНЕ НА ТЕМПЕРАТУРНОТО СТРАТИФИЦИРАНЕ В АКУМУЛАТОРИ НА ТОПЛИННА ЕНЕРГИЯ

Николай Харизанов, Нина Пенкова

Химикотехнологичен и Металургичен Университет – София,

nickolay.harryzanov@gmail.com, nina_ir@mail.bg

Резюме: Съставен е математичен модел за симулационно моделиране на нестационарните топло- и хидродинамични полета във воден акумулатор на топлинна енергия, интегриран в промишлена оранжерийна инсталация. Проведена е компютърна симулация на процесите чрез програмния продукт ANSYS Workbench CFX. В настоящата статия е направен оглед на подхода при изследванията и са представени първоначалните резултати. Крайната цел на изследванията е да бъдат зададени препоръки за оптимизиране.

Ключови думи: термично разслояване, оптимизация, акумулатор на топлинна енергия

1. Въведение

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 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 топлоакмулиращата 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.

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 циркуляционни помпи към колектори, свързани с отоплителната инсталация. При необходимост водата се дозгарява във водогрейните котли. Охладената в отоплителната инсталация вода постъпва в долния край на резервоара.

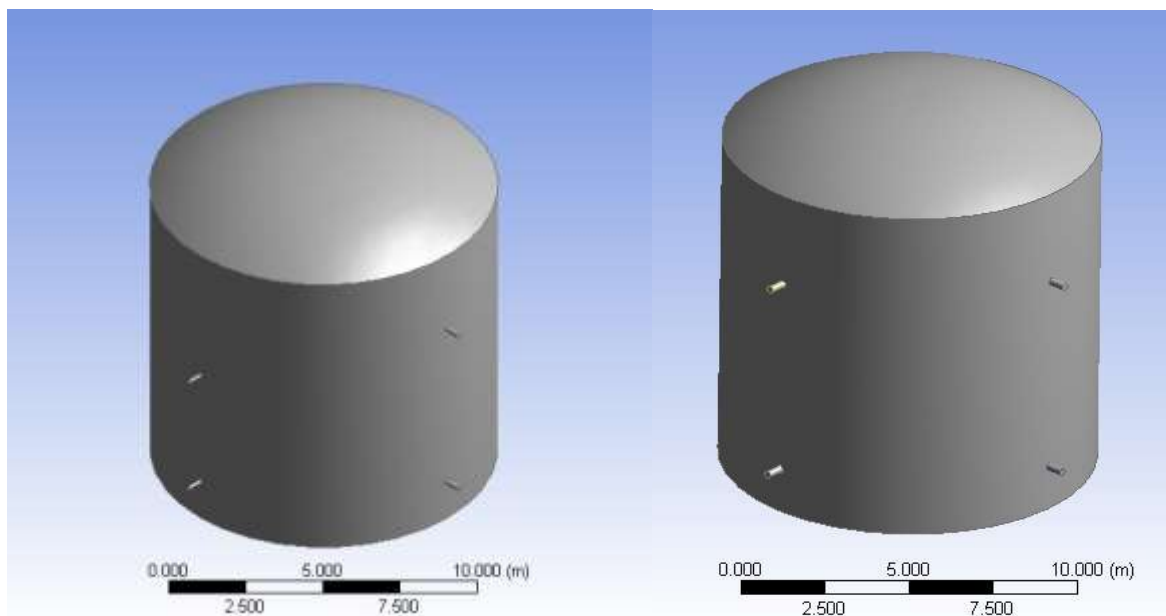
3. Симулационен модел в среда ANSYS

За извършването на симулацията беше използван софтуерният програмен продукт ANSYS, версия 14.5.

3.1. Изграждане на геометрия

Резервоарът беше моделиран чрез Design Modeler (фиг.1а,б) с неговите реални размери. Резервоарът е цилиндричен, вертикален, с височина 10,4 м, ширина 11,3 м 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 9 м. Стените и купола са топлоизолирани с външна топлинна изолация от 100 мм. минерална вата и обшивка от поцинкована ламарина.

Геометрията на модела (фиг.1) модела е създадена чрез използване на примитиви. Първоначално чрез фигурата торус са създадени флуида в колената на модела и фигури, които „обхващат“колена и работния флуид. Чрез командата „boolean“ и операция „subtract“ се оформя профила на колената. Следва командата „extrude“, с която се удължават профилите на работния флуид и на тръбите. Тръбите се обединяват чрез командата „boolean“ и операция „unite“. Чрез 2D схема и операция „revolve“ се създава профила фигура обхващаща работния флуид и по-голяма част от тръбите. Последното оформление на работния флуид се извършва чрез командата „boolean“ и операция „subtract“.

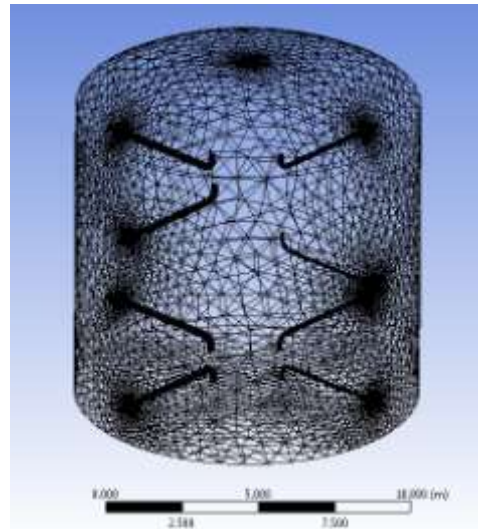


Фиг.1 а,б: Външен изглед на акумулатора

3.2. Омрежване на геометрията

Беше генерирана мрежа (фиг.2) на обекта чрез стандартните настройки. Не бяха използвани допълнителни настройки поради трудности да се опише чрез възли геометрията.

Настоящата мрежа се състои от 532477 възела и 2646883 елемента, от които 2592822 са тетраедри, 30577 – пирамиди, 14502-призми и 8982 хексаедри.



фиг.2: мрежа от елементи

3.3. Начални и гранични условия

При настройването на модела са зададени два домейна: един флуиден домейн, състоящ се от два флуида: въздух и вода и един твърдофазов домейн, на когото са зададени свойствата на стоманата. Зададени са адиабатни свойства на твърдофазовия домейн, за да се опрости компютърното пресмятане. Топлообменна между двата домейна може да бъде пренебрегнат, тъй като е пренебрежимо малък.

Външният слой на акумулатора е зададен като безкрайна тънка стена с коефициент на топлопреминаване $0.82 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Аналогично за дъното на акумулатора е зададен коефициент на топлопреминаване $1.662 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Зададени са околна температура 20°C и атмосферно налягане 10^5 Pa . Куполът на модела е зададен като отвор, тъй като в реалния обект се поддържа постоянно налягане в пространството над водния обем.

В горния край на акумулатора са зададени два входа, през които се подава вода с температура 85°C и дебит съответно $90 \text{ m}^3/\text{час}$ ($86,86 \text{ т/час}$) и $150 \text{ m}^3/\text{час}$ ($144,77 \text{ т/час}$). Срещу входящите тръбопроводи са зададени два изходящи потока. В долния край на резервоара са зададени два входа, всеки с дебит 100 т/час температура на водата 45°C и срещуположно на тях два изхода с дебита, равни на горните два входа. Турбулизацията на потоците се приема като стандартна средна с интензитет от 5%. За пресмятане на турбулентните зони се използва RNG k- ϵ модел на турбулентност.

Пресмятанията се извършват за двуфазна двукомпонентна система при използване на VOF алгоритъм. Естественото движение и разпределението на флуидите (вода и въздух) в пространството на резервоара се изчислява на базата на разлика в плътностите ($\rho - \rho_f$) при

референтна плътност на въздуха $\rho_r=1,2 \text{ kg/m}^3$. В таблица 1 са показани техните физични характеристики.

Табл. 1 : Физични характеристики на двете фази

Въздух	Вода
$\rho = 1,293 \cdot \frac{P}{T} \cdot \frac{273,15}{101325}$	$\lg \rho = 2,5405 - (1 - T/374,15)^{2/7} \cdot \lg 0,2740$
$c_p = 955 + 0,18 \cdot T$	$c_p = 4,1868 \cdot (0,6741 + 2,825 \cdot 10^{-3} T - 8,371 \cdot 10^{-6} T^2 + 8,601 \cdot 10^{-9} T^3)$
$\lambda = 0,02454 \cdot \left(\frac{T}{T_o}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{T_o + 147,7}{T + 147,7}\right)$	$\lambda = 4,1868 \cdot 10^{-4} \cdot (-916,62 + 12,547 T - 152,12 \cdot 10^{-4} T^2)$
$\mu = 17,1 \cdot 10^{-6} \cdot \left(\frac{T}{T_o}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{T_o + 89,77}{T + 89,77}\right)$	$\lg \mu = -10,73 + 1828/T + 1,966 \cdot 10^{-2} T - 14,66 \cdot 10^{-6} T^2$
	$\sigma = 71,97 \cdot [(374,15 - t)(349,15)]^{0,8105}$

Табл.2 : Използвани променливи

Използвана е функция степ (табл.2), по която се определя обемното разпределение на водната и въздушната фракция във флуидния домейн в началния момент на компютърните изчисления.

Expressions	
\sqrt{x} DenH	$(DenWater - DenRef)$
\sqrt{x} DenRef	$1.2 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$
\sqrt{x} DenWater	$988.1 \text{ [kg m}^{-3}\text{]}$
\sqrt{x} DownH	9 [m]
\sqrt{x} DownVFAir	$step((y - DownH) / 1 \text{ [m]})$
\sqrt{x} DownVFWater	$1 - DownVFAir$

3.4. Изчислителен процес

Изчисленията в програмния продукт ANSYS се извършват по метода на крайните обеми. Същността на метода се състои в избора на специални базисни (координатни) функции, всяка от които има краен носител, т.е. е различна от нула само в неголяма част от цялата област на дефиниране на задачата. Използва се полиномна функция, което опростява изчисляването.

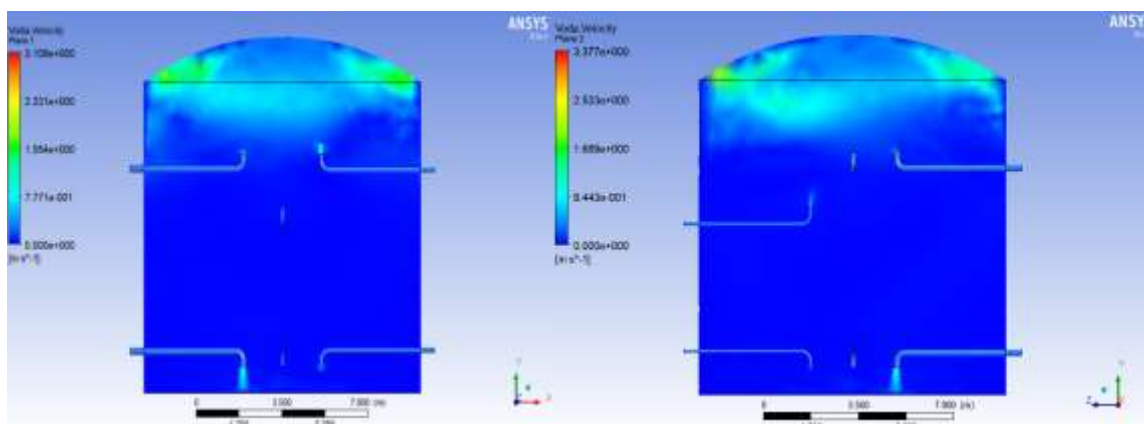
Дискретизацията на вариационна задача посредством методът на крайните елементи включва следните етапи:

- I етап- Разбиване на изходната област на подобласти – елементи
- II етап – Построяване на подходяща, за дадената вариационна задача
- III етап – Формиране и решение на система дискретни (алгебрични) уравнения
- IV етап – Оценка на точността на полученото решение

Схемата на пресмятане е High Resolution, с брой итерации на стъпка 10, критерий за сходимост $1 \cdot 10^{-4}$. Симулацията беше прекъсната след 22 часа пресмятане. Поради зададената ниска стъпка са изчисление 10 минути и 15 секунди.

3.5. Резултати

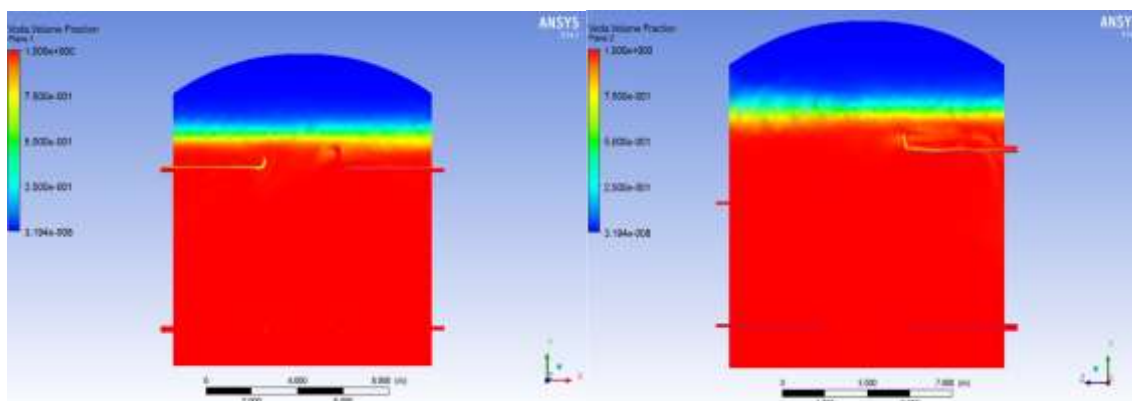
Изчислено бе следното температурно разпределение във флуидния домейн.



фиг. 3: Надлъжен разрез, определящ температурното разслояване в xu (фиг.3а) и yz (фиг.3б) - координатна система

Наблюдава се слаб ефект на входящите потоци върху началното температурно поле от 50 °C. Присъствието на по-топли и по-студени полета около входовете на тръбното пространство на акумулатора се обяснява със скоростните и температурни градиенти, чиито стойности не намаляват при преминаването си в тръбното пространство поради липсата на грапавост на солидния домейн и поради неговите адиабатни характеристики.

Следните резултати за обемните фракции (фиг.3а,б) са изчислени.



фиг. 3: Надлъжен разрез, определящ обемните фракции в xu (фиг.3а) и yz (фиг.3б) - координатна система

На двете криви може да забележи относително голяма преходна зона между двата флуида с широка преходна зона от около 0,7 метра. С жълто са оцветени зоните с предимно водна фракция, със зелен фон са видими зоните със сравнително еднакво присъствие на двата флуида, а със светло-синьо тези с предимно водна фракция. Вследствие на зададените изходни потоци се наблюдава засмукване на въздушния флуид в тръбното пространство. Предвид

разликата по височина на изходните потоци и поддържаното ниво на водния флуид това ефект е слабо вероятен в реалния обект.

4. Заключение

На базата на получените резултати бе решено да се изгради по-ситна мрежа особено в зоната на свободната повърхност, чрез която да се търсят изчислително по-релевантни стойности. Установи се, че за пресмятане със сходимост от $1 \cdot 10^{-4}$ е необходимо няколкодневно компютърна работа до достигане на квазистационарното състояние на акумулатора. Извършеният опит бе полезен опит за предстоящите изследвания. Моделни изследвания на температурната стратификация при зареждане без разреждане с оглед установяване на максималната продължителност на периода, в който водата от долната част на акумулатора може да бъде използвана за охлаждане на двигателя в когенератора, предстоят да бъдат извършени.

Възможности за повишаване на температурната стратификация при настоящата конструкция на акумулатора могат да бъдат осъществени чрез:

- Мерки за намаляване на турбулизацията във водната среда в областите до зареждащите и разреждащите линии;
- Вариране с поддържаното ниво на водата.

Литература:

1. Калоянов Н., Теплообменни 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 Lazaro, Pablo Dolado, Belen 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

INVESTIGATION OF THE THERMAL STRATIFICATION BY THERMAL ENERGY STORAGE TANKS

Nickolay Harryzanov, Nina Penkova

University of Chemical Engineering and Metallurgy – Sofia,

nickolay.harryzanov@gmail.com, nina_ir@mail.bg

Abstract: *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. Computer simulation through the programmed software ANSYS Workbench CFX is taken. In the current paper is made a review on the approach of the investigations and the initial results are presented. The ultimate purpose of the investigations is to be given recommendations for optimization.*

Key words: thermal stratification, optimisation, heat energy storage tank