

**ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И  
МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЧНО И СИСТЕМНО  
ИНЖЕНЕРСТВО  
КАТЕДРА „ИНЖЕНЕРНА ХИМИЯ“**

---

**ДИПЛОМНА РАБОТА**

**Изследване на хидродинамиката в ерлифт реактор с  
външна циркуляционна тръба**

**ЗА ОБРАЗОВАТЕЛНО - КВАЛИФИКАЦИОННА СТЕПЕН  
“Бакалавър”**

**Ръководител катедра:**

доц. д-р Силиян Чаушев

**Научен ръководител:**

гл.ас. д-р Десислава Мутафчиева

**Консултант:**

доц. д-р Веселин Илиев

**Дипломант:**

Стела Паньовска, фак.№ ХИ-0400

Септември, 2015 София

**ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И  
МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ**

Катедра: „Инженерна химия”

УТВЪРЖДАВАМ,

/доц. инж. С. Чаушев/

## ЗАДАНИЕ

**за изработване на дипломна работа**

на студента: Стела Пламенова Паньовска

фак. № ХИ-0400,

степен: „Бакалавър”

специальность: Химическое инженерство

1. Тема:Изследване на хидродинамичното поведение в ерлифт реактор с външна циркулационна тръба
2. Изходни данни:
3. Съдържание на дипломната работа.
  - 3.1. Увод, цел и задачи
  - 3.2. Литературен обзор за периода от1995.до 2015върху хидродинамиката на ерлифт реактор с външна циркулационна тръба и математично моделиране на този тип рекатор.
  - 3.3. Обекти на изследване: Ерлифт реактор с външна циркулационна тръба
  - 3.4. Методи за изследване /изпитване: Компютърни системи със софтуерния продукт Ансис.
  - 3.5. Експериментални резултати.
  - 3.6. Обсъждане на експерименталните резултати, включително графики и таблици.

Научен ръководител:

/

# Съдържание

|      |                                                                |    |
|------|----------------------------------------------------------------|----|
| I.   | Увод.....                                                      | 4  |
| II.  | Литературен обзор.....                                         | 6  |
|      | 1. Ерлифт реактори - конструкции, предимства и приложение..... | 6  |
|      | 2. Хидродинамика.....                                          | 8  |
|      | 2.1. Газосъдържание.....                                       | 9  |
|      | 2.2. Скорост на циркулация на течната фаза.....                | 10 |
|      | 3. Турболентност - модели за описание.....                     | 11 |
|      | 4. Метод на крайните елементи.....                             | 14 |
| III. | Експериментална част.....                                      | 16 |
|      | 1. Обект на изследване.....                                    | 16 |
|      | 2. Метод на изследване.....                                    | 17 |
|      | 2.1. Метод на крайните елементи.....                           | 17 |
|      | 2.2. Описание на използвания софтуерен продукт.....            | 17 |
|      | 2.3. Изграждане на геометричния модел.....                     | 20 |
|      | 2.4. Определяне типа на елементите.....                        | 23 |
|      | 2.5. Определяне гъстотата на елементите.....                   | 24 |
|      | 2.6. Определяне на аналитичните параметри.....                 | 28 |
| IV.  | Обсъждане на опитните резултати.....                           | 29 |
| V.   | Изводи.....                                                    | 33 |
| VI.  | Използвана литература.....                                     | 34 |

## I- Увод

Ерлифт реакторите са едни от най-перспективните устройства за масопренесяне между газ и течност. Тези апарати все по-често се използват в индустриален мащаб за аеробни ферментационни процеси, за получаването на едноклетъчен протеин и за биологичното пречистване на отпадъчни води [1]. Това се обуславя от относително високата скорост на масопренесяне между газовата и течната фаза и най-вече от ниските енергийни разходи и отсъствието на движещи се работни елементи в апарата.

Проектирането, конструирането и търсенето на оптимални експлоатационни условия на един газотечностен реактор може да стане на базата на подходящи математични модели.

За това е необходимо да се разполага с надеждни данни за газосъдържанието във фазите и скоростите във възходящата и низходящата част на ерлифт реактора, да се изведат емпирични корелации за определяне на тези хидродинамични параметри.

Поведението на двуфазните потоци в тези газотечни реактори се изследват с помощта на експериментални и числени методи.

Последните години изчислителна динамика на флуидите (Computational Fluid Dynamics, CFD) намира все по-широко приложение за изследване на хидродинамиката на тези апарати. CFD методите са много подходящи за изучаване на двуфазните течения в ерлифт реакторите. Те са полезни за анализ и оптимизация и се пестят време и средства.

Компютърни симулации на двуфазни потоци в ерлифт апарати с вътрешна циркулационна тръба са правени от доста автори Van Baten et al. [2], [3], et al [4] и др. Обаче CFD моделиране на двуфазни потоци в ерлифт с външна циркулационна тръба са доста ограничени Roy et al. [5] and Roy and Joshi [6]. Математичното моделиране и проектиране на ерлифт реакторите въпреки напредъка на компютърните симулации и използването на CFD, остава трудна задача поради сложния характер на взаимодействие и смесване на фазите и на комплексната хидродинамична картина в двуфазната система.

Целта на дипломната работа е да се проведе симулационно изследване на хидродинамиката на ерлифт реактор с външна циркулационна тръба с помощта

на софтуерната програма ANSYS - CFX 14 за определяне на основните хидродинамични параметри: газосъдържание и скорост на циркуляция.

За постигане на целта на дипломната работа бяха поставени за решаване следните задачи:

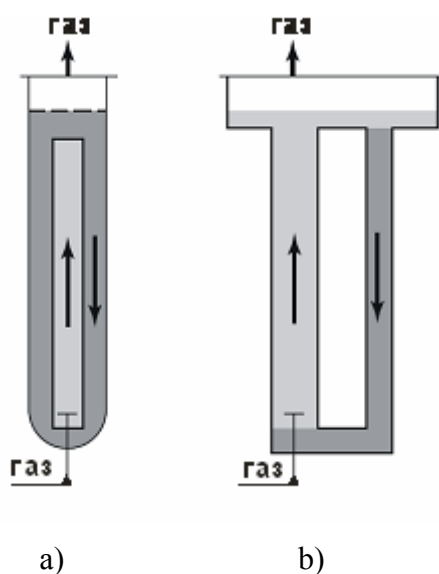
1. Да се направи верификация на избрания модел.
2. Да се създаде стационарна постановка на модела.
3. Да се проведе нестационарно решение за определяне на газонапълването във времето в различни сечения по височина на възходящата тръба в ерлифт реактора.

## II- Литературен обзор

### 1. Ерлифт реактори - конструкции, предимства и приложение

Ерлифт реакторите са газотечностни контактни устройства, които представляват особен интерес за биотехнологичните производства. Те се срещат най-често в две конфигурации: ерлифт реактор с вътрешна циркуляционна тръба (фигура 1a) и ерлифт с външна циркуляционна тръба (фигура 1b).

От хидродинамична гледна точка ерлифт реакторите са уникални с това, че газовият поток предизвиква течния поток. По принцип тези реактори съдържат течна фаза, която е разделена в две вертикални зони, свързани една с друга в горната и долната част на апарата. В една от тези зони (т. нар. „възходяща” част) се подава газ и в резултат на разликата в газосъдържанието в нея и незахранваната с газ „низходяща” част се получава разлика в плътностите на течната фаза в двете зони, което води до нейната циркулация – нагоре във възходящата част на реактора, надолу в нейната низходяща част. Големината на циркулацията на течната фаза е един от най-важните параметри при проектирането и мащабния преход на ерлифт реакторите, тъй като циркулацията на течността влияе върху газосъдържанието в апарата, преобладаващия хидродинамичен режим и степента на смесване в реактора.



*Фиг.1.Конструкции ерлифт реактори*

От друга страна, при ерлифт реакторите могат да бъдат достигнати твърде високи линейни скорости на течната фаза, без да има необходимост от наличието на външни устройства за осигуряване на рециркулация.

Ерлифт реакторите имат редица предимства, като подобро разбъркване на течната фаза, дължащо се на вътрешните и външни рециркуляционни потоци. Циркулационните ерлифт реактори са подходящи за създаване на различни хидродинамични и кинетични режими във възходящата и низходящата част на един и същ апарат.

Предимствата на ерлифт реакторите в сравнение с традиционните реактори с механично разбъркване, например стандартен ферментор, са:

- Отсъствие на механично задвижвани части;
- Слабо тангенциално напрежение;
- Относително проста конструкция и поради тази причина малка вероятност за технически неизправности;
- Надеждно освобождаване на газа в горната част на реактора;
- Голяма специфична междуфазна повърхност на контакт при малки разходи на въвежданата енергия;
- Уникална комбинация от контролиран хидродинамичен режим и добро смесване;

Също така, трябва да се отбележи, че ерлифт реакторите могат да работят лесно в стерилни условия като резултат от простата си конструкция. Допълнително предимство на ерлифт реакторите с вътрешна циркулация е тяхната проста геометрия, тъй като по същество те представляват барботажни колони с вътрешна тръба. Докато ерлифт реакторите с външна циркулация имат няколко допълнителни предимства в сравнение с тези с вътрешна циркулация:

- Възможност за прецизно дефиниране на времепрестоя в индивидуалните секции на ерлифт реактора;
- Възможност за регулируемо освобождаване на газовата фаза във върха на ерлифт реактора;
- Достъпност за измервания и контрол и във възходящата, и в низходящата част на ерлифт реактора;

- Вентилът, разположен между възходящата и низходящата част на ерлифт реактора, позволява регулиране на скоростта на течната фаза независимо от дебита на входния газов поток;
- Ефективен топлообмен и контрол на температурата;
- Проста геометрия на индивидуалните части (тръби), оправдаващи използването на прости модели;
- Оптимален хидравличен диаметър и за възходящата, и за низходящата част на ерлифт реактора и затова ниски загуби от триене;
- Визуално наблюдение на процеса, ако ерлифт реакторът е конструиран от прозрачен материал (например, плексиглас).

Технологичните процеси, провеждани в ерлифт реакторите, са по-икономични, отколкото тези в реакторите с разбъркване за процеси на превръщане с висок разход на кислород, например производството на едноклетъчен протеин.

### **Приложение на ерлифт реакторите**

През последните години са извършени редица изследвания за приложението на циркулационните ерлифт реактори за провеждане на най-различни биотехнологични процеси: ферментация, биологично пречистване на отпадни води, производство на клетки, включително животински и растителни, производство на антибиотици и ензими

От тази гледна точка, в ерлифт реакторите трябва да се извърши ефективен процес на пренасяне на кислорода и поддържане на концентрацията на разтворения кислород, изискващ познания за хидродинамиката на процеса, смесването и характера на пренасяне на кислорода.

## **2.Хидродинамика**

Хидродинамиката на газотечностните реактори се определя от условията на въвеждане на енергия и маса в двуфазната среда, както и от типа на апарата, който се използва.

Фундаменталните параметри за моделиране, проектиране и мащабиране на газотечностни реактори са режимът на течение, газосъдържанието и скоростта на циркулация.

Основното затруднение при математичното моделиране и проектиране на барботажните реактори е недостатъчната информация за хидродинамиката, което при ерлифт реактора се усложнява от циркуляционен двуфазен поток

Хидродинамиката на ерлифт реактора се изучава и моделира чрез редица изследвания главно през последните години. Най-ранното изследване е направено от Freedman и Davidson Joshi [7], които анализират хидродинамиката на ерлифт реактора, като използват макроскопичен моментен баланс и пренебрегват ефекта на триене. Редица изследователи развиват математични уравнения за ерлифт потока, които се основават частично на работата на Freedman и Davidson [7].

Важни теоретични модели са тези на Chisti et al. [8], Garcia Calvo [9], които се основават на баланса на механичната енергия и тези на Hsu и Dudukovic [10], Verlaan [11], които са следствие от разглеждането на моментния баланс. Някои от тези модели отчитат двумерно изменение на профилите на скоростта и газосъдържанието, докато други отчитат само аксиалната промяна на тези параметри.

Важен аспект в моделирането на хидродинамиката на барботажните реактори е връзката между зависимите променливи, като газосъдържание и скорост на циркулация на течността и независимите променливи, като приведената скорост на газа, физичните свойства на флуидите и геометрията на реактора.

## 2.1. Газосъдържание

Газосъдържанието е един от най-важните параметри, които се използват за описание на газотечните системи. Газосъдържанието  $\epsilon_G$  се дефинира като обема на газовата фаза  $V_G$ , отнесен към целия обем на двуфазната смес ( $V_G + V_L$ ) и се дава със следната формула:

$$\epsilon_G = \frac{V_G}{V_G + V_L} ,$$

т.е. газосъдържанието е обемната фракция на газовата фаза в газотечната система и може да се приеме за постоянно във всяка точка от газотечната смес, като изключение прави само горният слой, състоящ се от устойчива пяна.

Газосъдържанието определя още времепрестоя на газа в течността и може да се определи от времепрестоя на газа в колоната или с други думи, мехурите се нуждаят от определено време  $\tau$ , за да преминат от разпределителя до върха на колоната.

В ерлифт реакторите индивидуалното газосъдържание във възходящата тръба  $\epsilon_r$  и в низходящата  $\epsilon_d$  съответно могат да бъдат дефинирани и свързани с общото газосъдържание по следния начин:

$$\epsilon_G = \frac{A_r \epsilon_r + A_d \epsilon_d}{A_r + A_d}$$

където  $A_r$  е сечението на възходящата тръба,  $A_d$  е сечението на циркуляционната тръба.

Стойностите на газосъдържанието за отделните части – възходящата тръба  $\epsilon_r$  и низходящата  $\epsilon_d$  са много по-полезни, понеже те дават основа за определяне скоростта на циркулация и смесването. Газосъдържанието в циркуляционната тръба  $\epsilon_d$  е по-малко отколкото във възходящата  $\epsilon_r$ . При малки скорости на газа  $\epsilon_d$  обикновено е пренебрежимо малко, доколкото повечето от мехурите имат достатъчно време да напуснат течността. Степента на тази разлика зависи главно от начина на освобождаване на газа.

Обикновено се публикуват средната стойност на газосъдържанието, т.е. отнесена към целия обем на реактора. Средното газосъдържание се използва като ключов параметър за анализ на режима на течение и за определяне на времепрестоя.

При ерлифт реакторите разликата в газосъдържанието между възходящата тръба и низходящата генерира движещата сила за течната циркулация.

Газосъдържанието е важен параметър при дизайна и мащабирането на газотечностните реактори. Стойностите на газосъдържанието зависят главно от приведената скорост на газа и са много чувствителни към изменение на работните условия, на физикохимичните свойства на газотечната среда, на типа и размерите на барботьора.

## 2.2. Скорост на циркулация на течната фаза ( $U_L$ )

Скоростта на циркулация е основен хидродинамичен параметър в ерлифт реактора и това, което го отличава от барботажния реактор. Тя оказва съществено влияние върху газосъдържанието в апарата, преобладаващия хидродинамичен режим, коефициентите на топло- и масопренасяне и степента на смесване в реактора.

Движещата сила на циркулация на течността е небалансираното хидростатично налягане между низходящата и възходящата тръба, предизвикано от разликата между газосъдържанието и следователно в общата плътност на флуида в двете зони. Съпротивлението за циркулационния поток на течността е определено от загубите от триене в циркулационната тръба, които зависят от скоростта на течността. Течността циркулира по точно определен път: възходящ поток във възходящата тръба и низходящ поток в низходящата тръба. Средната скорост на циркулация се дефинира като:  $\bar{U}_{Lc} = \frac{x_c}{t_c}$ , където  $x_c$  е дължината на траекторията на циркулация, а  $t_c$  е средното време за една пълна рециркулация.

Скоростта на циркулация на течността влияе на хидродинамичната характеристика на газотечния поток, затова една от основните задачи на хидродинамичното пресмятане на ерлифт реактори е определянето на приведената скорост на течността,  $U_L$ . Тя се определя от обемния дебит на циркулиращата течност. Циркулацията зависи от разхода на подавания газ. При малки скорости на газа  $U_G$ , вследствие бързото увеличаване на газосъдържанието, приведената скорост на течността бързо нараства. При по-нататъшно увеличение на  $U_G$  настъпва преход към основния режим на движение, при който  $\epsilon_G$  нараства слабо, а увеличаването на течността в газовия поток затруднява триенето ѝ в стените на тръбата, в следствие на което приведената скорост на течността се изменя незначително.

## 3. Турбулентност - различни модели за описание

Турбулентният поток, има вихрова структура, при което се различават едромасштабни и дребномасштабни вихри. При преноса на импулс участвуват

всички видове вихри. Най-големите вихри имат мащаб от порядъка на основното течение. В процеса на турбулентен пренос те се разпадат на по-малки вихри, които от своя страна се разпадат на още по-малки, докато се стигне до вихри с такъв малък мащаб, че върху тях започва да влияе вискозитетът и кинетичната им енергия чрез вискозното триене се превръща топлинна. Този процес се нарича вискозна дисипация на механичната енергия. Съществува, следователно, цяла каскада на пренос в турбулентните потоци.

Предложеното от Рейнолдс разделяне на турбулентното течение на осреднено, “псевдоламинарно” и пулсационно има определен физичен смисъл, който го отличава от ламинарното течение. Така например, ние можем да въведем за осредненото течение линии на тока успоредни на стените и да го разглеждаме като слоесто, но не трябва да забравяме, че тези слоеве са проникваеми за пулсационните съставки, които пренасят от едно място на друго крайни обеми от течност наречени **“моли”** със съответните им количество движение, енергия и маса.

Първата полуемпирична теория за турбулентния пренос е теорията на Бусинеск (Boussinesq). По аналогия с ламинарните течения той въвежда т.н. *турбулентен вискозитет*:

$$\tau_{xy}^{(t)} = -\mu^{(t)} \frac{d\overline{v_x}}{dy}$$

Голямата трудност при решаването на задачи с турбулентност е, че за да се „обхванат“ тези високочестотни флуктуации е необходимо да се използват мрежи с много малки размери и много малки стъпки във времето. Броят на клетките  $N$  необходими за пълна тримерна турбулентна симулация е равен на

$$N = 5^3 \text{Re}^{9/4},$$

където  $\text{Re}$  е критерия на Рейнолдс за съответното течение.

Първоначално стойността на  $\mu^{(t)}$  е считана за постоянна, което е твърде далеч от реалната физическа картина на процеса.

Сериозен напредък в развитието на теорията на турбулентността е направен с хипотезата на Прандтл за пътя на смесване. Прандтл изхожда от аналогията между пеноса в ламинарния поток, който се извършва чрез хаотично движение на молекулите, и турбулентния пренос, който се извършва чрез хаотично движение на крайни по обем “моли”. За разлика от молекулите,

молите са временни образувания. Те възникват, съществуват определено време, при което се движат хаотично, пресичайки отделните “слоеве” на осредненото псевдоламинарно течение и се разрушават. През време на своето съществуване молът не взаимодействува с околната течност. При неговото разпадане неизбежно възниква пулсация.

Решението на турбулентните проблеми се свежда до определяне на турбулентните вискозитет. За целта са съставени модели за турбулентност, базиращи се на приблизителни емпирични уравнения. Потребителят трябва да избере един от моделите на турбулентност.

По-долу са показва най-често използваните модели за описание на турбулентните течения.

#### 1. **Zero Equation Model - Алгебричен модел - без диференциални уравнения**

Предимства - прост за пресмятане

Недостатъци - не дава добри резултати при наличие на циркулационни зони и работи при по-проста геометрия.

#### 2. **One equation model: k- модел, $\mu$ - модел**

#### 3. **Two equation models k- $\epsilon$ модели, k- $\omega$**

Предимства - дава реалистична картина, особено при турбулентни течения в тръби и канали.

Недостатъци - Използването му в някои случаи води до “преувеличение” на турбулентността на потока.

#### 4. **Reynolds stress models** наречен RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes).

При RANS модела всичките транспортни величини се осредняват за всичките турбулентни флуктуации във времето, което позволява използването на относително груби мрежи за голям брой системи, при това не са необходими големи изчислителни ресурси. Влиянието на турбулентността се отразява с допълнителни уравнения в модела. Осредняването при RANS се основава на факта, че големините на турбулентните флуктуации и останалия поток се различават значително. Поради това Рейнолдс е предложил параметрите на течението да се разглеждат като сума от две съставлящи : *осреднена във времето съставляща* и *пулсационна съставляща*.

Горните турбулентни модели на турбулентност, с изключение на Zero Equation Model, в граничните слоеве флуид/стена се комбинират с модели за граничния слой.

**К-ε моделът на турбулентност** не е валиден директно за граничния слой. За крайните елементи в близост до стената в ANSYS се използват няколко модели за турбулентните гранични слоеве.

#### 4. Метод на крайните елементи

Методът на крайните елементи (МКЕ) се използва при решаването на широк клас полезни задачи, които се описват със сходни частни диференциални уравнения. При този метод се изследват полета в хомогенни и нехомогенни, изотропни и анизотропни, линейни и нелинейни среди, анализират се стационарни и нестационарни задачи, също така се решават задачи в двумерни и тримерни области.

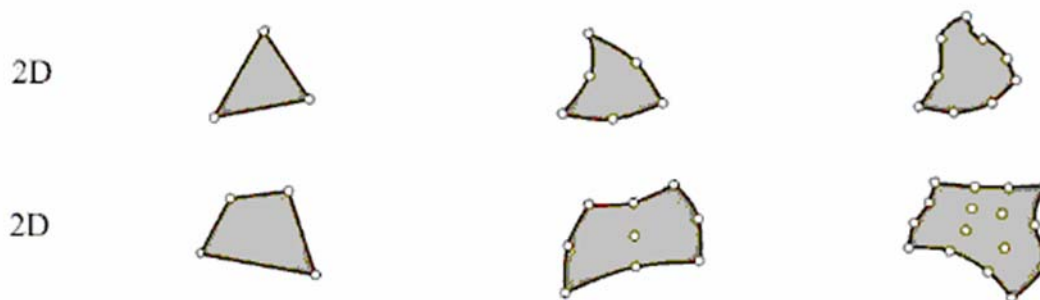
Основното при този метод е, че всяка непрекъсната величина (налягане, температура) може да се апроксимира с дискретен модел, който се състои от непрекъснати функции (полиноми), които са определени за краен брой подобласти (крайни елементи).

В рамките на всеки краен елемент се дефинира краен брой точки, наречени възли, в които стойността на величината е неизвестна и трябва да бъде получена при решението на системата уравнения, която описва процеса.

Първа стъпка при решаването на задача по Метода на крайните елементи е дискретизацията на изследваната област. Тя включва формата, размерите и броя на крайните елементи, на които се разбива областта при етапите описани по долу:

- **Разбиване на изходната област на подобласти – елементи**

- разбиване в двумерните области (2D) – триъгълници, правоъгълници;



Фиг.2. Елементи в двумерната област

- разбиване в тримерното пространство (3D) – тетраедри и паралепипеди;



Фиг.3. Елементи в тримерната област

- **Дефиниране на подходяща функция за дадена задача**

Като подходяща функция се използват полиноми, които за всеки елемент на дадена подобласт са полиноми на определена степен с неизвестни коефициенти, а са непрекъснати за цялата област.

Еднозначността на определяне на полином във всяка област се обославя от това, че всяка една възлова точка на подобласта се задават фиксирани стойности на полинома.

- **Формиране и решение на система дискретни (алгебрични) уравнения.**

Приблизително решение по МКЕ се приема допустима функция, на която параметрите се определят с някакво интегрално тъждество или по вариационен начин. В резултат на това, изходната задача се свежда до система дискретни алгебрични уравнения, решение на която представляват търсени параметри(коефициенти) от приблизителното решение.

- **Оценка на точността от полученото решение**

Точността, която допустимата функция апроксимира търсеното решение на изходна задача. Математичното изследване на метода показва, че крайните полиномни функции, при известна непрекъснатост на търсеното решение, обезпечават много точно решение, ако се въведат достатъчен брой подобласти (елементи) или се използва полином от по-висока степен.

- **Верификация и валидация на модела**

На базата на валидация и верификация на модела се прави оценка за достоверността на резултатите. Валидация имаме когато резултатите получени при решението с математичния модел се сравняват с емперични данни получени от експерименти.

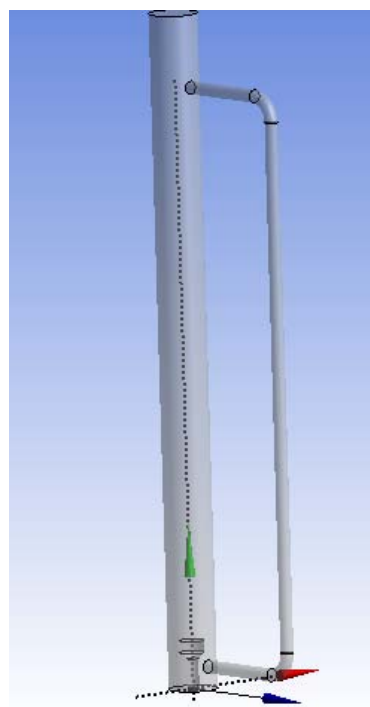
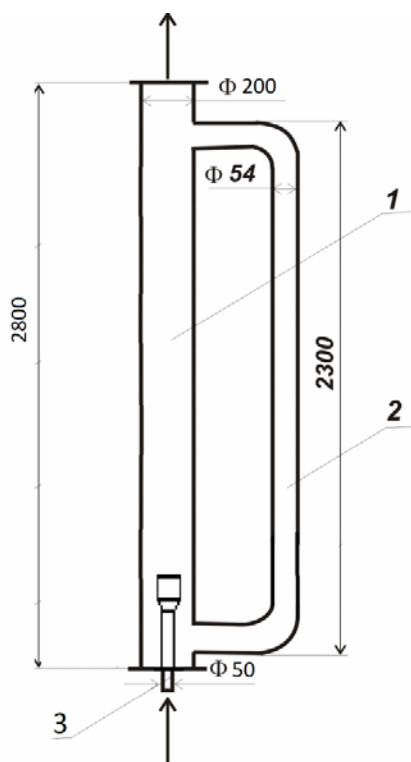
Така се прави оценка на реалистичността на модела. Процес на верификация на модела е когато е необходимо да бъде направена оценка на модела за неговата

способност да дава вече известни резултати и неговото съответствие със законите за маса и енергия и др.

### III-Експериментална част

#### 1.Обект на изследване

Обектът на изследване е Ерлифт реактор с външна циркуляционна тръба показан на фигура 4, състоящ се от възходяща тръба (1), низходяща или циркуляционна тръба (2) и барботьор (3), тип перфорирана плоча с диаметър 110 mm с 41 отвора, всеки от които с диаметър 1 mm. Във възходящата тръба на 10 cm от дъното е поставен барботьорът 3, през който се подава газът в колоната със скорост 0.5 m/s. В колоната 1 се осъществява възходящо движение на газотечната смес, а в циркуляционната тръба 2 – низходящо движение на газотечната смес.



Фиг.4 Ерлифт реактор с външна циркуляционна тръба  
(1)– възходяща тръба, (2) – циркуляционна тръба, (3) – барботьор

## **2. Метод на изследване**

За компютърната симулация на хидродинамичното поведение на двуфазната среда в ерлифт реактора с външна циркуляционна тръба (фигура 4) е използван по-горе описаният метод на крайните елементи, който е заложен в софтуерния пакет ANSYS CFX.

### **2.1.Описание на използвания софтуерен продукт**

„ANSYS”, основана през 1970г., се развива в световен мащаб на пазара на инженерна симулация. Софтуерът е широко използван от инженери и дизайнери в широк спектър от индустриални задачи. Компанията се фокусира върху развитието на отворени и гъвкави решения, които дават възможност на потребителите да анализират проекти директно на работния плот.

„ANSYS” предлага цялостен софтуерен пакет, който обхваща голяма гама от физиката, осигуряване на достъп до почти всяка сфера от инженерна симулация.

„ANSYS” инструментите за анализ на известния CFD включват ANSYS Fluent и ANSYS CFX [12], които се предлагат отделно или заедно във вързопа ANSYS CFD [13].

Основните етапи, през които се преминава при числено изследване посредством CFD са: построяването на математичен модел, дискретизацията му, численото му решаване и интерпретация на получените резултати.

CFD намира все по-широко приложение в различни индустрии, като аерокосмическа, автомобилна, строителство на различни сгради и съоръжения (едни от последните приложения са при моделирането на вятърни турбини и нефтени сонди), химическа, металургия, машино- и уредостроене.

ANSYS CFX [14] е софтуер с висока производителност. Напредналата технология е ключът към постигането на надеждни и точни решения – бързо и енергетично.

### **2.2.Изграждане на геометричния модел**

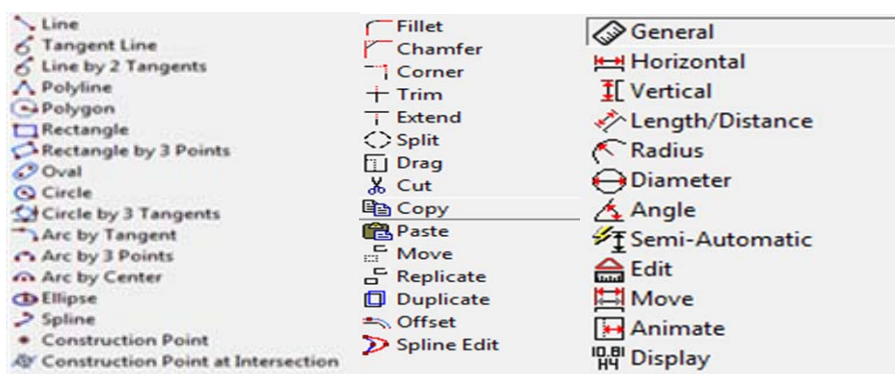
За изграждането на триизмерен (3D) модел е генериран 2D чертеж. За създаването на последния, бърботьора и външната циркуляционна тръба в

средата на ANSYS Workbench Design Modeler са използвани някои от основните функции:

- Line – за построяване на линии;
- Circle- за изчертаване на окръжност;
- Arc by 3 points – за изчертаване на дъга по 3 точки;
- Arc by centre – за изчертаване на дъга по 2 точки и център;
- Trim – за изтриване на ненужните линии;

**За оразмеряване на чертежа се използват следните функции:**

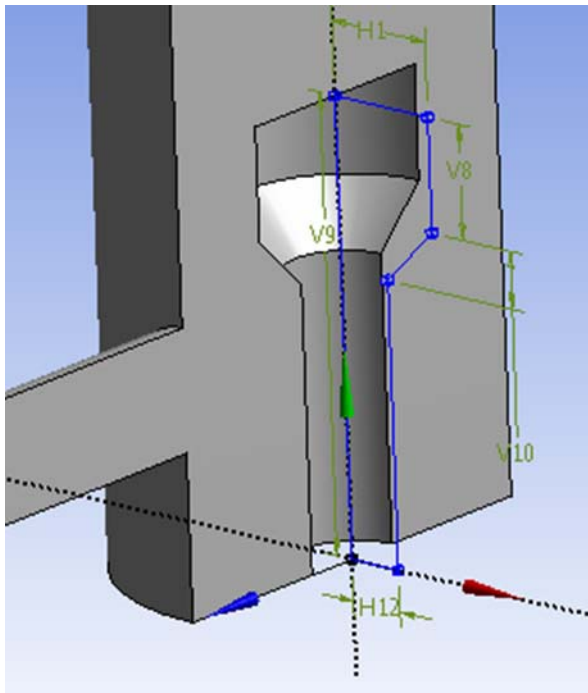
- Horizontal – за хоризонтални размери;
- Vertical – за вертикални размери;
- Radius – за радиус;
- Diameter – за диаметър;
- General – линейни размери;



*Фиг.5. Основни функции за генериране на 2D чертеж*

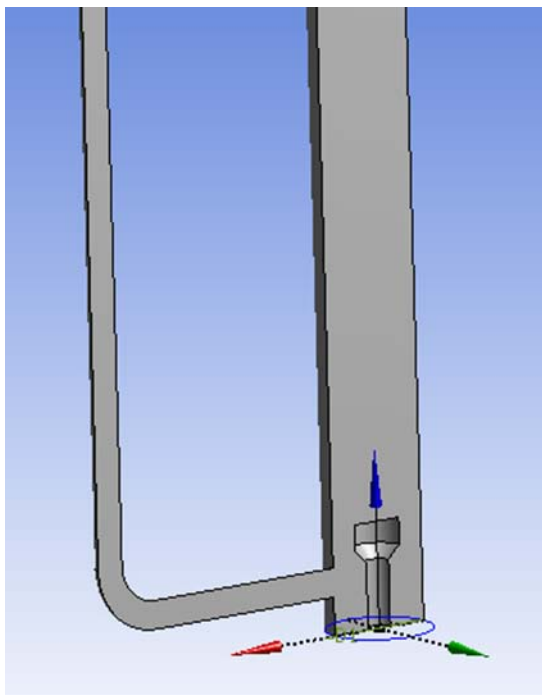
Построяването на 3D геометричния модел се извършва, като се използват вече създаденият Sketch и основните функции в среда ANSYS Workbench Design Modeler, описани по-долу.

Функцията Revolve  Revolve е използвана при изчертаването на барботьора

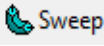


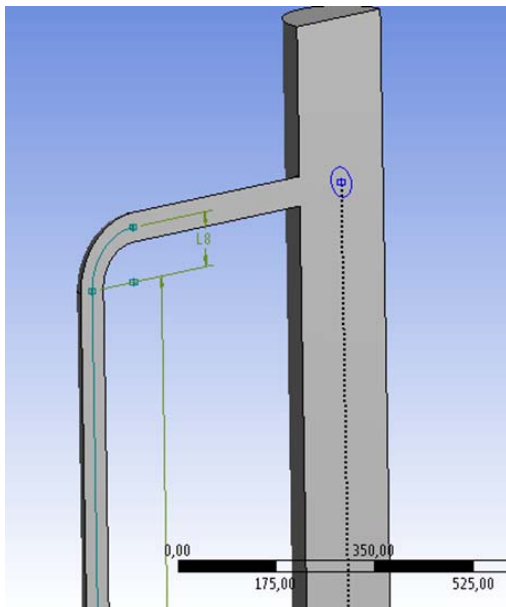
Фиг.6. Sketch на барботьора

Функцията Extrude  Extrude е използвана при генериране на възходящата тръба



Фиг.7. Sketch на възходящата тръба

Функцията Sweep  се използва при изчертаване на външната циркулационна тръба.

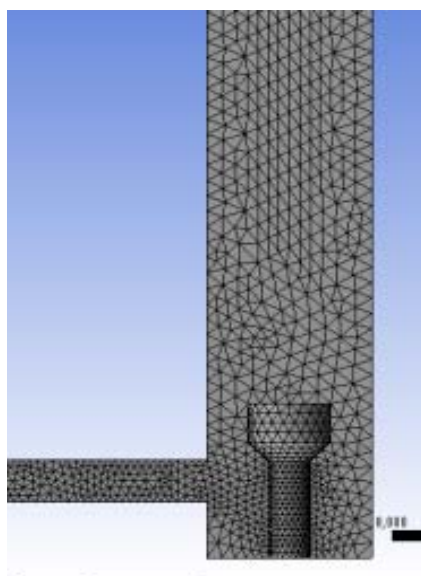


Фиг.8. Sketch на външната циркулационна тръба

Функцията Symmetry  е използвана за разделяне на геометричния модел спрямо равнина на симетрия.

Функцията Freeze  е използвана “замразяване“ на телата, където е необходимо за да избегне обединяването на телата

## 2.3.Определяне типа на елементите

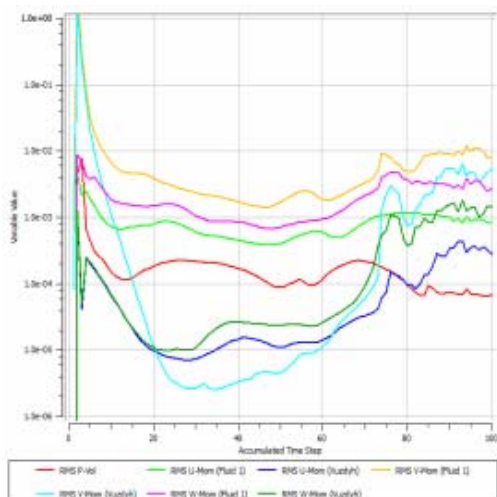


Фиг. 9

В началото е извършена компютърна симулация на процеса с мрежата от контролни обеми показана на фигура 9, генерирана от компютърната система по задаване. Статистиката на мрежата е показана на фигура 10. Пресмятанията са извършени при максимален брой на итерациите равен на сто, като са следени кривите дадени на фигура 11, показващи средно квадратичното отклонение между две итерации за налягането и количеството на движението.

|          |        |
|----------|--------|
| Nodes    | 23364  |
| Elements | 102641 |

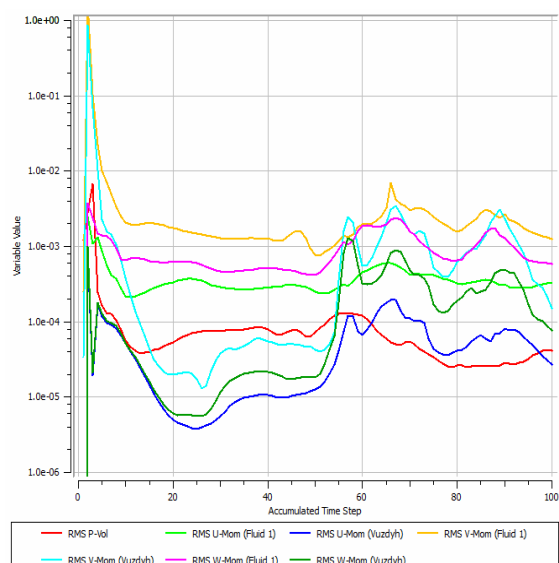
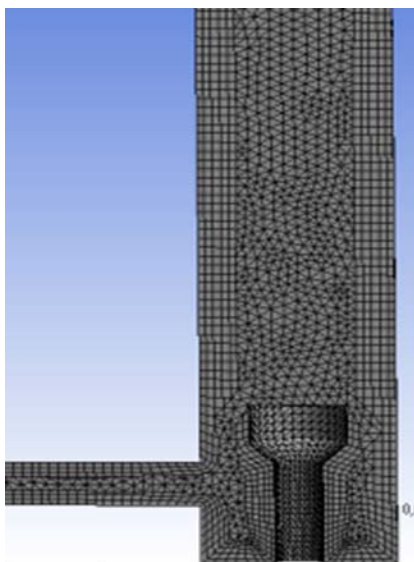
Фиг. 10



Фиг. 11

Както се вижда повечето от кривите показани на фигура 9 са разположени над  $1.0e-04$  - стойност, която обикновено се определя като желателна за оценка точността на решението. Това показва, че параметрите на модела (в случая формата на елементите) не е подходяща и би трябвало да се промени.

Един от възможните начини за подобряване конфигурацията на елементната мрежа е въвеждането с функцията *Inflation* на граничен слой от елементи при стените на домейна, който да моделира краевите ефекти на течението, както е показано на фигура 12. Статистиката на мрежата е показана на фигура 13. Пресмятанията са извършени при максимален брой на итерациите равен на сто, като са следени кривите дадени на фигура 14, които показват средно квадратичното отклонение между две итерации за налягането и количеството на движението.

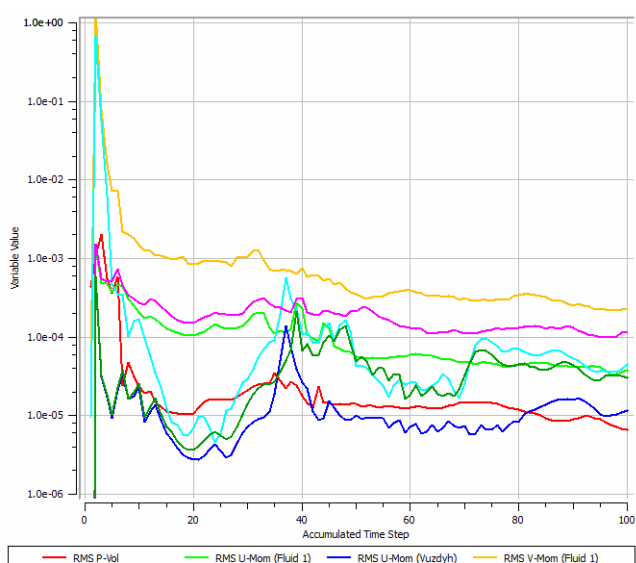
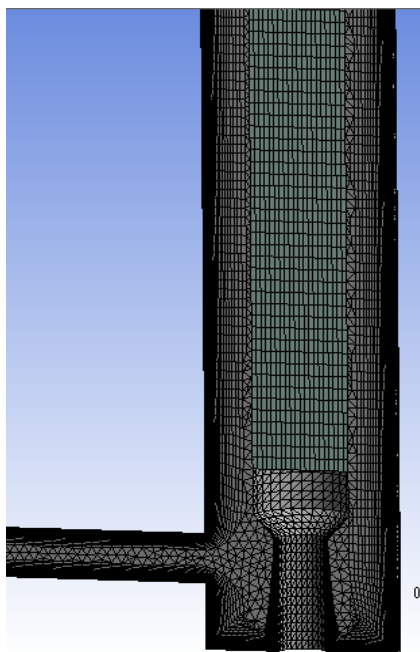


|                |        |
|----------------|--------|
| $\Phi_{uz.12}$ |        |
| Nodes          | 88084  |
| Elements       | 250732 |

$\Phi_{uz.14}$

$\Phi_{uz.13}$

Друг възможен начин за подробяване на мрежата е т.нар. мрежа *Sweep* (фигура15). Статистиката на мрежата е показана на фигура 16. Пресмятанията са извършени при максимален брой на итерациите равен на сто, като отново са следени кривите дадени на фигура17.



$\Phi_{uz.17}$

$\Phi_{uz.15}$

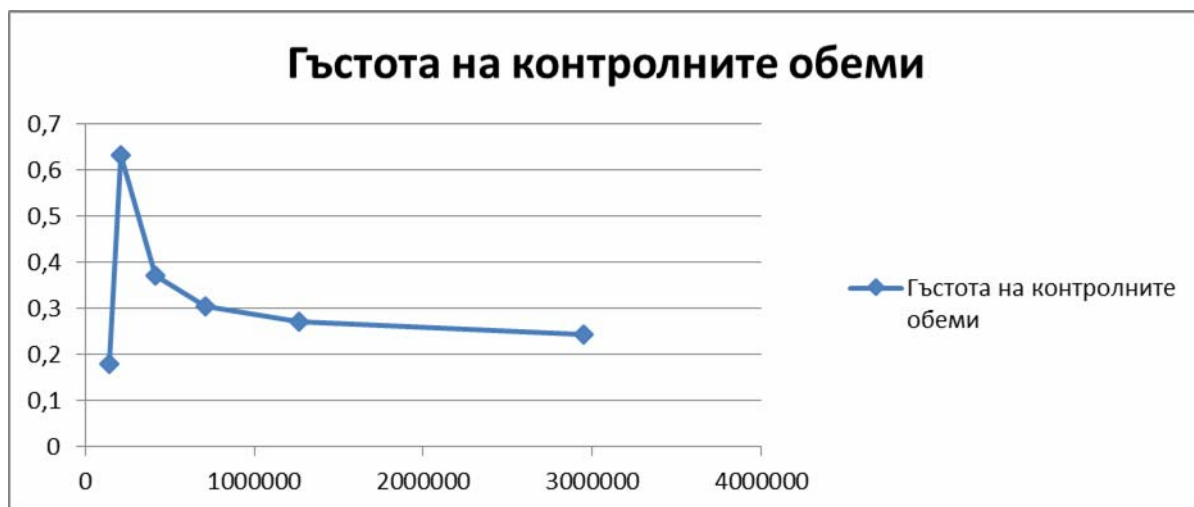
|                                   |        |
|-----------------------------------|--------|
| <input type="checkbox"/> Nodes    | 377168 |
| <input type="checkbox"/> Elements | 710330 |

Фиг.16

Както се вижда от фигура 17 кривите при този тип мрежа слизат най – ниско към  $1.0\text{e-}04$ , докато при другите две мрежи е над  $1.0\text{e-}03$  и следователно е подходящо, да бъде избрана мрежата Sweep за по нататъшните пресмятания.

## 2.4.Определяне гъстота на елементите

За определяне гъстотата на контролните обеми са извършени пресмятания с различен брой елементи, като за критерии е приета разликата  $\Delta$  между максималната и минималната стойност на газосъдържанието в отделните части на едно напречно сечение намиращо се в средата по височина на домейна. Резултатите са показани на фигура18.



Фиг.18. Гъстота на контролните обеми

На базата на проведените анализ се установява, че при мрежа с гъстота 710330 елемента се получават най-добри резултати. Увеличаването на броя на елементите до 1 300 000 или до близо 3 000 000 не води до подобряване на разположението кривите, а също така отнема много време за изчисление и изисква по- голям ресурс от компютъра. Поради тази причина по нататъшните пресмятания са извършени с мрежа, чиито брой на елементите е около 710 000.

## 2.5.Определяне на аналитичните параметри

Аналитичните параметри на модела са:

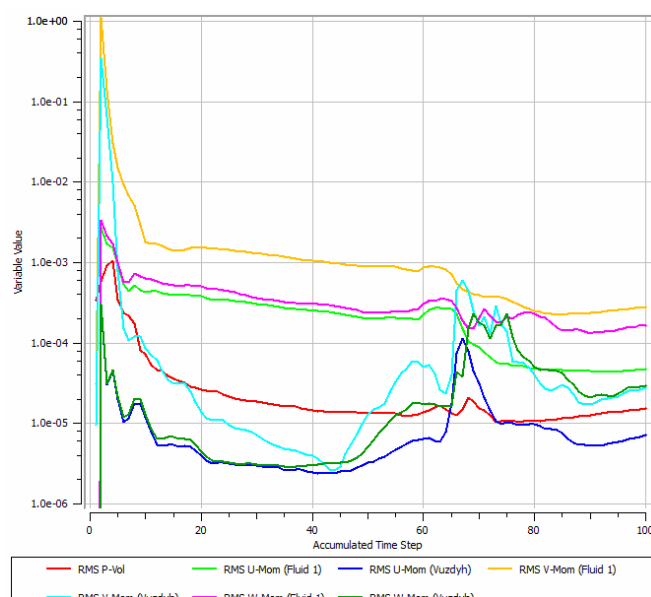
- типа на диференчната схема ( High resolution по подразбиране),
- численият модел за турбулентност ( First order по подразбиране),
- времето за една итерация ( стъпка  $\Delta t$ ).

За установяване на подходящата комбинация на тези параметри са проведени следните изчисления, при които отново са наблюдавани кривите на средно квадратично отклонение:

### - Числен модел за турбулентност: First order

Диференчната схема: High resolution

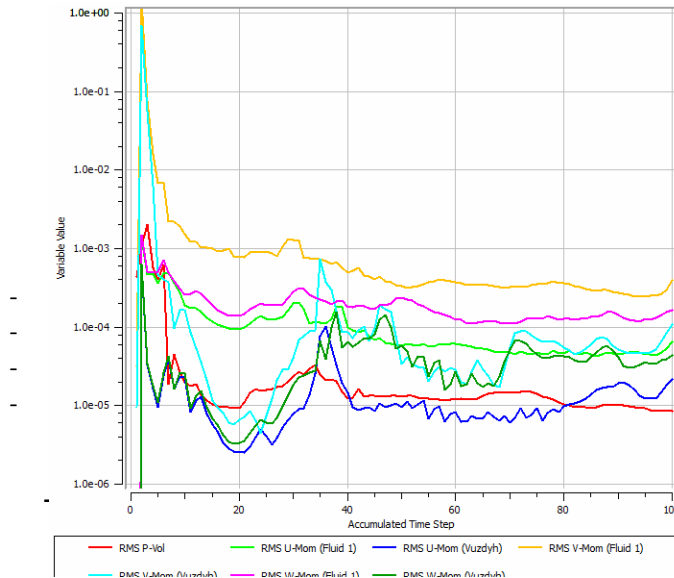
Стъпка  $\Delta t$ : 0.1s



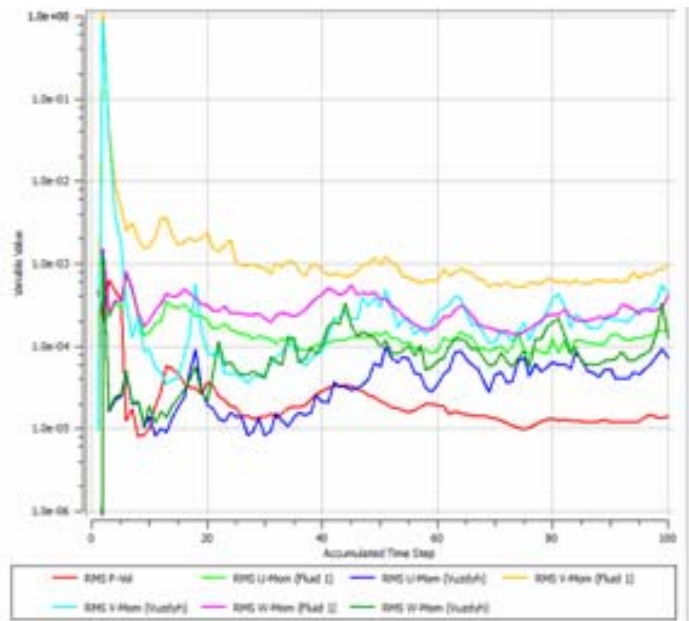
- **Числен модел за турбулентност: First order**

Диференчната схема: High resolution

Стъпка  $\Delta t$ : 0.2s



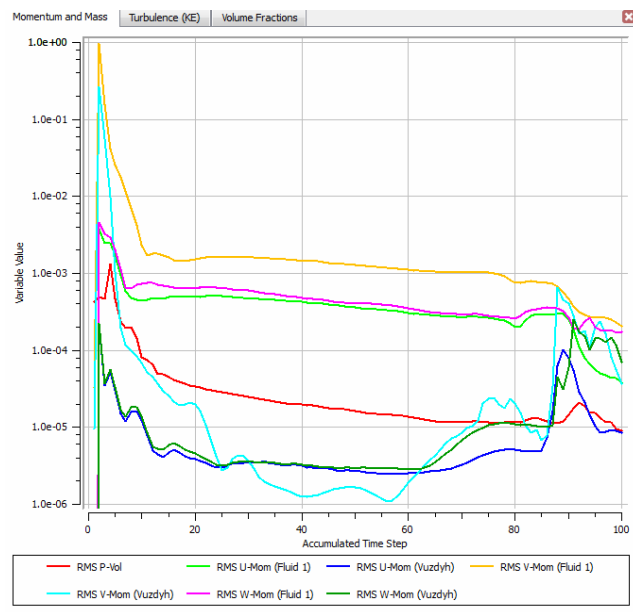
Стъпка  $\Delta t$ : 0.5s



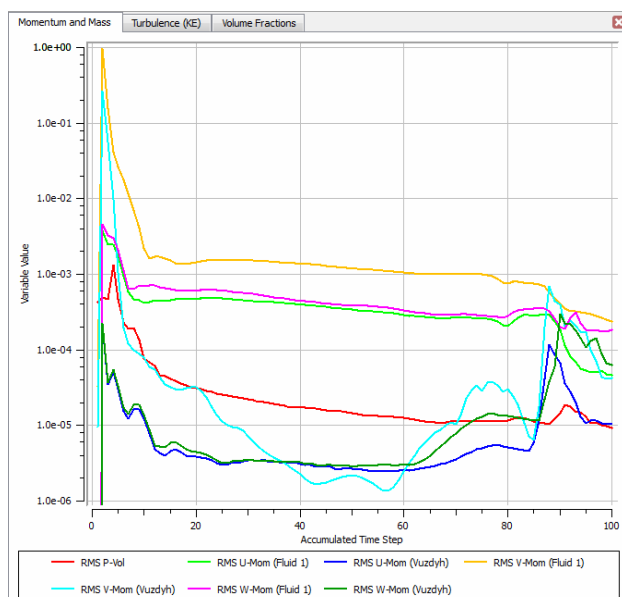
- **Числен модел за турбулентност: First order**

Диференчната схема: Specified Blend Factor 0.6

Стъпка  $\Delta t$ : 0.075s



- **Числен модел за турбулентност: First order**  
Диференчната схема: Specified Blend Factor 0.9  
Стъпка  $\Delta t$ : 0.075s

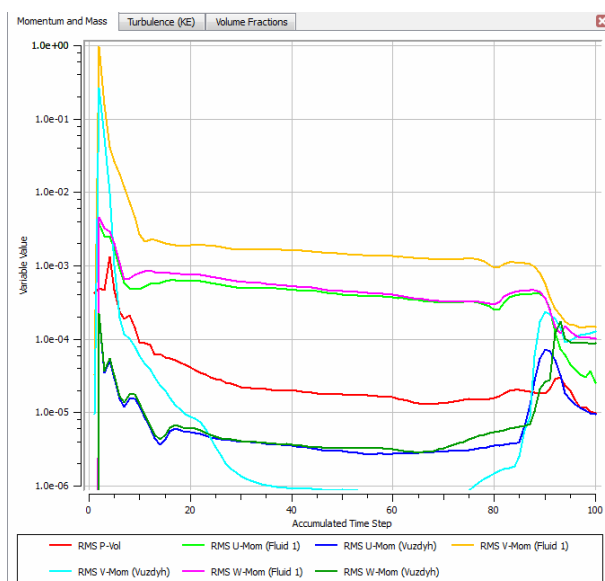


При анализите с Specified Blend Factor се вижда, че няма подобрене на кривите.

- **Числен модел за турбулентност: High Resolution**

Диференчната схема: Upwind

Стъпка  $\Delta t$ : 0.075s



При проведения анализ на кривите на средно квадратичното отклонение се установи, че най – добри резултати се получават при **числен модел за турбулентност: High Resolution, Диференчната схема: Upwind и стъпка  $\Delta t$ : 0.075s.**

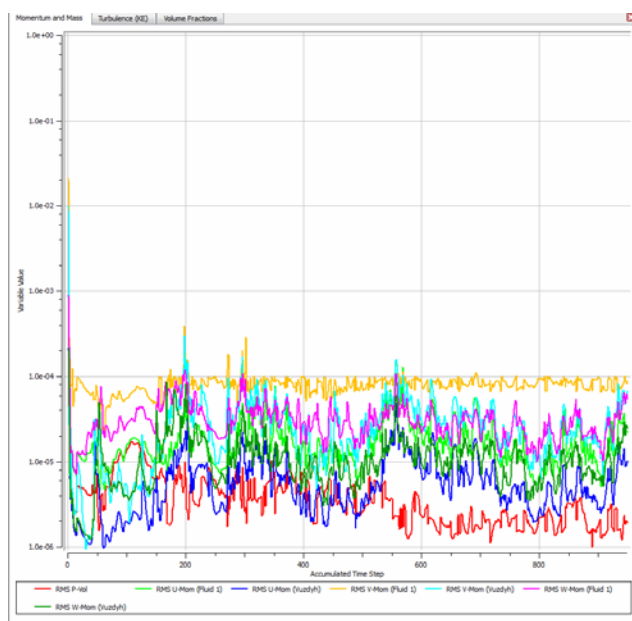
## 2.6. Определяне на параметрите на модела при нестационарно течение

Докато при стационарните решения стъпката  $\Delta t$  е фиктивна, то при нестационарните решения тя има реален физически смисъл и значително влияе върху сходимостта и резултатите от решението. За установяване на подходящата стъпка първоначално беше направен опит за решение със стъпка 1s, при което системата блокира със съобщение за числена грешка. При намаляване на стъпката на 0,5s решението беше успешно, но получените криви на средно квадратично отклонение (фигура19) могат да бъдат оценени като незадоволителни. Задоволителен резултат се получи при стъпка 0,1s (фигура20), но при една значителна консумация на процесорно време (фигура21). За съкращаване времето на решение беше направен опит, при който за начални

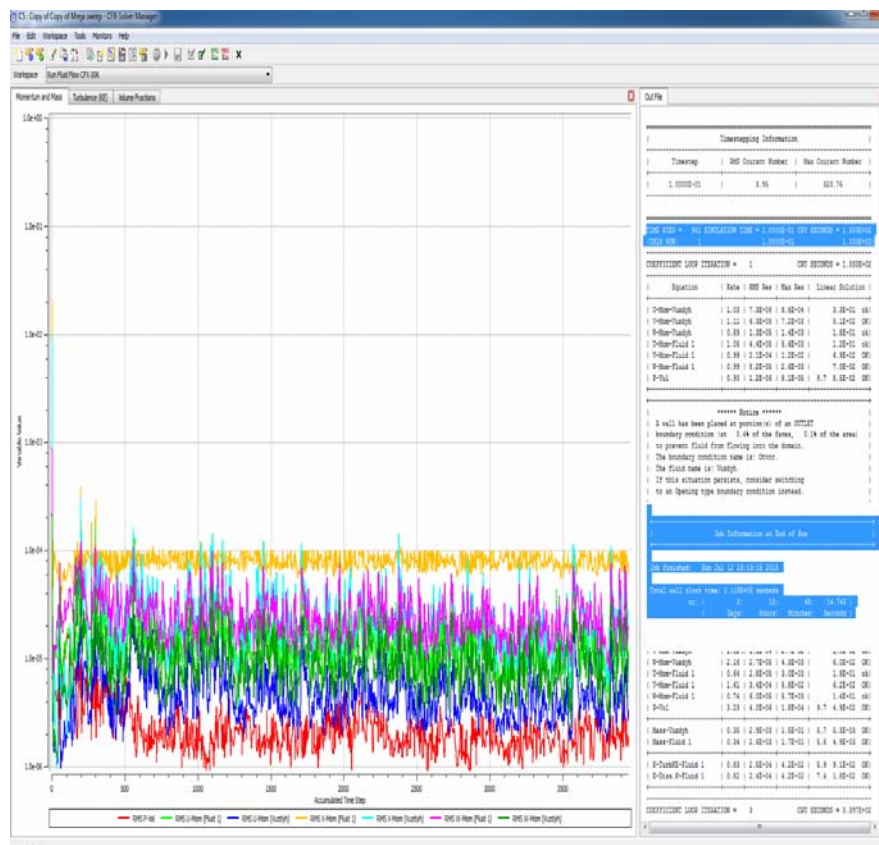
условия на всяка итерация се вземат не резултатите от предишната, а се екстреполират резултати от няколко предишни итерации.



Фиг.19



Фиг.20



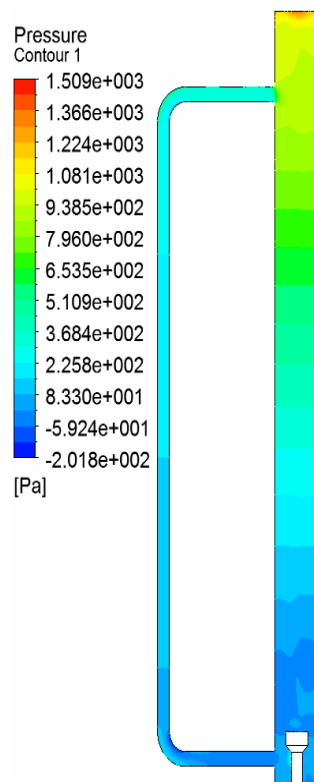
Фиг.21

## IV. Обсъждане на опитните резултати

### 1. Стационарно решение на задачата

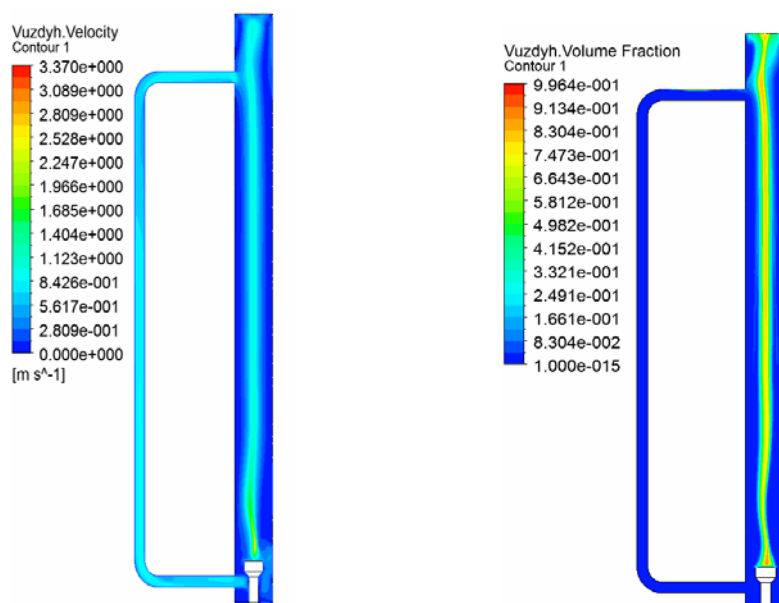
Получените числени резултати за разпределението на налягането, на газосъдържанието и на скоростта на течността при една и съща приведена скорост на газа са представени под формата на цветни контури и вектори.

На фигура 22 е показано разпределението на налягането по височината на колоната при скорост на газа 0.5 m/s и диаметър на отворите 1 mm.



Фиг.22. Разпределението на налягането

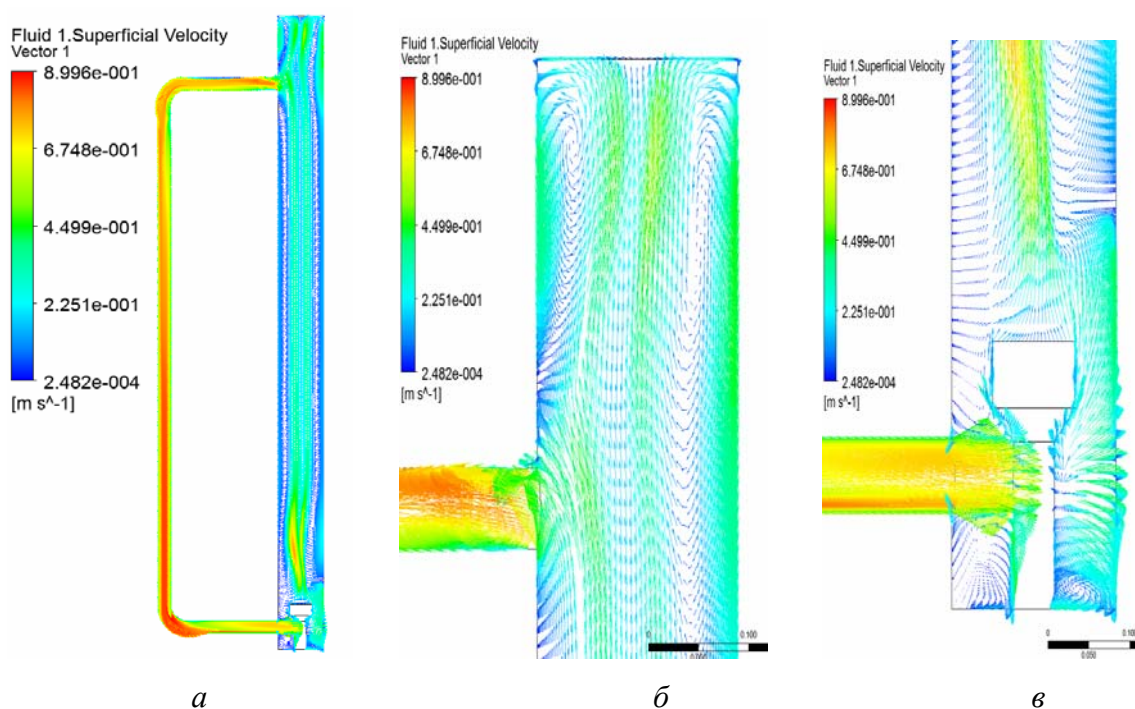
На фигура 23 и фигура 24 са представени аксиалното разпределението съответно на скоростта на газа и на газосъдържанието.



Фиг.23. Скорост на въздуха

Фиг.24. Контурно представяне на газосъдържанието

На следващите фигури е показано векторно разпределението на скоростта на водата ( Fluid 1 ), по височината на колоната (фиг.25 а) и в близък план в областта близо до барботьора (фиг. 25 б,в).

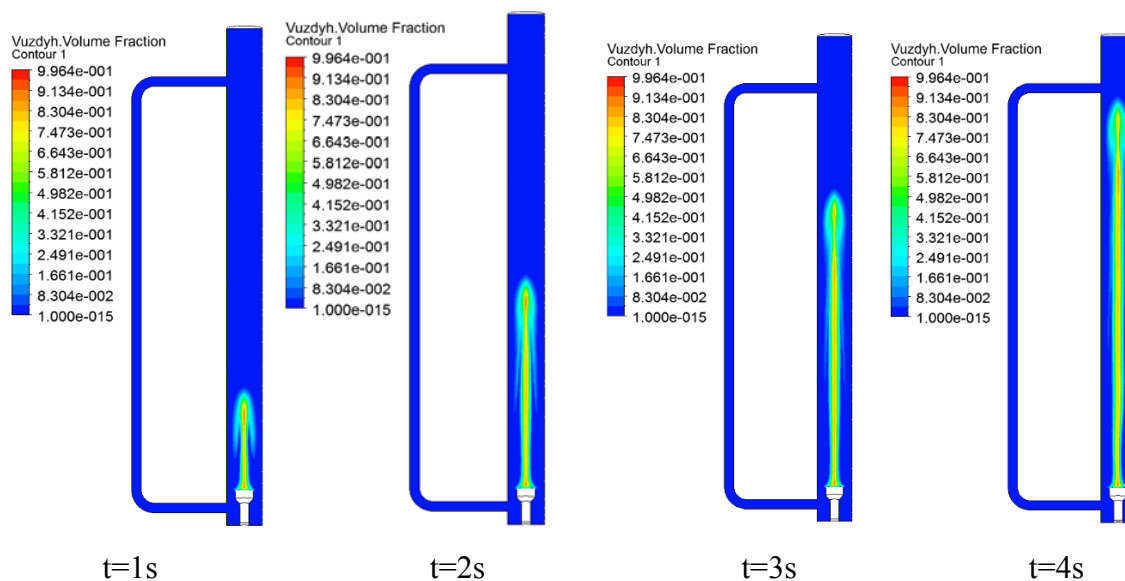


Фиг.25. Векторно разпределение на скоростта на водата

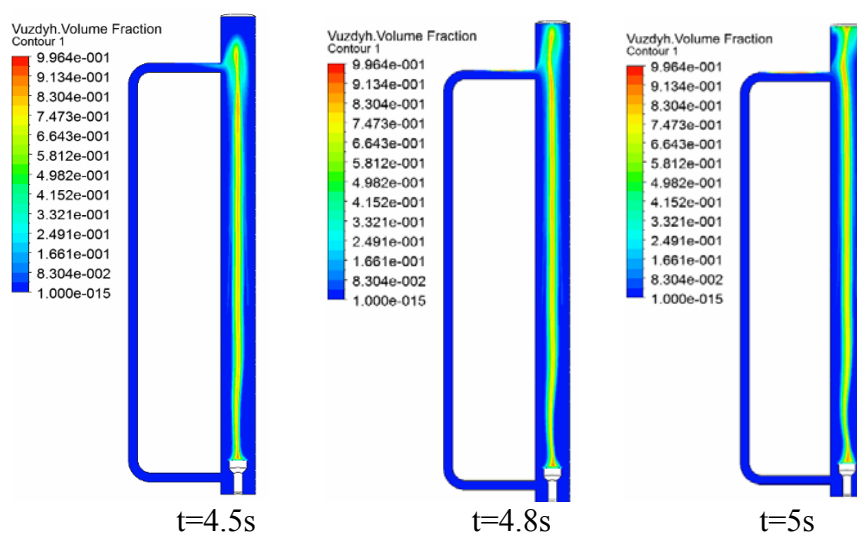
## 2.Нестационарно решение

При нестационарното решение също като при стационарното скоростта на въздуха е 0.5m/s и диаметра на отворите е 1 mm.

При проведеното нестационарно решение се проследява газонапълването т.е. изменението на газосъдържанието при една и съща приведена скорост на газа във времето.

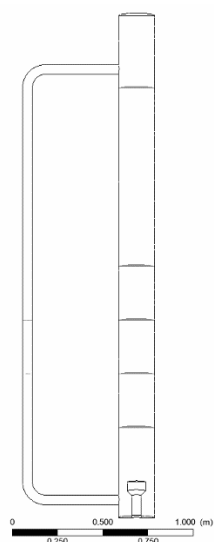


Фиг. 26. Изменение на газосъдържанието във времето



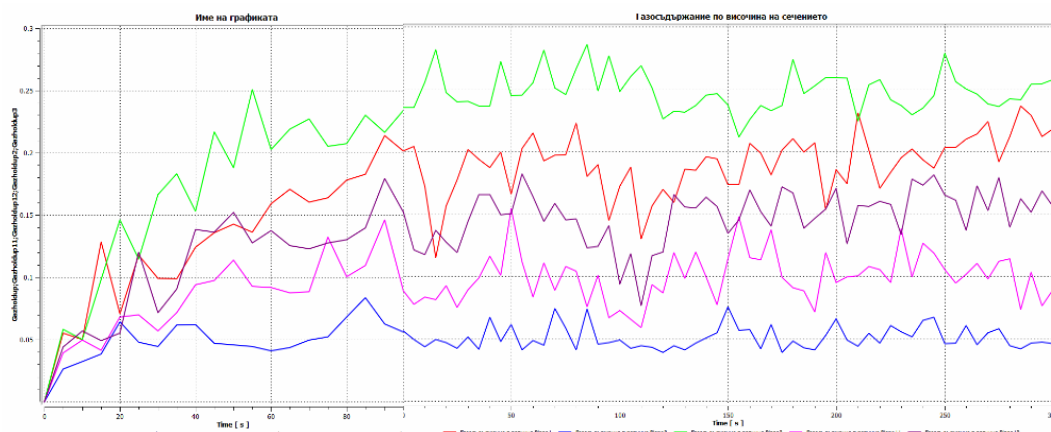
Фиг. 26.Изменение на газосъдържанието във времето.

За проследяване изменението на газосъдържанието по височнина на възходящата тръба дефинираме 5 равнини на симетрия, дефинираме 5 равнини на симетрия, като първите четири са по 25 см една от другата, а петата е на 1 м. от четвъртата.



Фиг.27. Равнини на симетрия

На следващата графика е показано разпределението на газосъдържанието по височината на възходящата тръба.



Фиг.28. Разпределение на газосъдържанието

## V.Изводи

От направените в дипломната работа стационарни и нестационарни симулации на хидродинамиката в ерлифт реактор с външна циркулационна тръба могат да се направят следните по - важни изводи:

1. При проведения анализ на кривите на средно квадратичното отклонение се установи, че най – добри резултати се получават при избор на Sweep мрежа.
2. От получените числени резултати и направената верификация на модела е избран **числен модел за турбулентност k -  $\epsilon$ : High Resolution, Диференчната схема: Upwind и стъпка  $\Delta t$ : 0.075s.**
3. Като цяло може да се твърди, че избраният **k -  $\epsilon$  турбулентен модел** и избраната Sweep мрежа дават добри резултати за моделиране на хидродинамиката на този тип колони.
4. Числените резултати от стационарното решение следват очакваните тенденции за хидродинамичното поведение на двуфазните потоци в ерлифт реактор с външна циркулационна тръба.
5. Нестационарното решение не води до по-добра сходимост на решението и до значително подобряване на разпределението на избраните хидродинамични параметри: газосъдържание и скорост на газа и течността.
6. За нестационарната симулация е необходимо повече изчислително време и по-голям компютърен ресурс, което за разглеждания случай не е необходимо и оправдано.
7. Разработеният компютърен модел за предсказване на хидродинамичното поведение в ерлифт реактора е подходяща основа за по нататъшни изследвания.

## VI. Използвана литература

- [1]. Onken, U. and Weiland, P., 1990, A simplified model of hydrodynamics in airlift reactors. *Bioprocess Eng.* 5. 129-139
- [2]. van Baten J.M., Ellenberger J., Krishna R., 2003, Hydrodynamics of internal air-lift reactors: experiments versus CFD simulations, *Chemical Engineering and Processing*, 42, 733-742.
- [3]. van Baten, J.M. and Krishna, R., 2003, Comparison of Hydrodynamics and Mass Transfer in Airlift and Bubble Column Reactors Using CFD, *Chemical Engineering & Technology*, Volume 26, Issue 10, pages 1074–1079.
- [4]. Blazej, M., Kiša, M., & Markoš, J. (2004a). Scale influence on the hydrodynamics of an internal loop airlift reactor. *Chemical Engineering and Processing*, 43, 1519–1527.
- [5]. Roy S., Dhotre M.T., Joshi J.B., 2006, CFD simulation of flow and axial dispersion in external loop airlift reactor, *Chemical Engineering Research and Design*, 84(A8),677-690.
- [6]. Roy S., Joshi J.B., 2008, CFD study of mixing characteristics of bubble column and external loop airlift reactor, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 3, 97-105.
- [7]. Freedman, W. and Davidson, J. F. (1969) Hold-up and liquid circulation in bubble columns. *Trans. Instn. Chem. Engrs.* 47, Y251-T262
- [8]. Chisti, M. Y., 1989, *Airlift Bioreactors*, Elsevier Science Publishers LTD, 120, 284-285.
- [9]. García-Ochoa, J., Khalfet, R., Poncin, S., Wild, G., 1997. Hydrodynamics and mass transfer in a suspended solid bubble column with polydispersed high density particles. *Chemical Engineering Science* 52, 3827-3834.
- [10]. Hsu, Y.C., Dudokovic, M., 1980, Gas hold-up and liquid circulation in gas–liquid reactors, *Chem. Eng. Sci.*, 35, 135–141.
- [11]. Verlaan, P., 1987, Modelling and characterization of an airlift-loop bioreactor, Ph.D. thesis, Agricultural University, Wageningen.
- [12]. ANSYS CFX-Solver Modeling Guide, Release 14.0, ANSYS Inc, 2011
- [13]. ANSYS CFX-Solver Theory Guide, Release 14.0, ANSYS Inc, 2011
- [14]. ANSYS FLUENT Theory Guide, Release 14.0, ANSYS Inc, 2011

