# ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ СОФИЯ

ФАКУЛТЕТ ПО ХИМИЧНО И СИСТЕМНО ИНЖЕНЕРСТВО КАТЕДРА "ИНЖЕНЕРНА ХИМИЯ"

# ДИПЛОМНА РАБОТА

на тема

Компютърна симулация на хидродинамичното поведение в ерлифт реактор с вътрешна циркулационна тръба

Ръководител катедра:

доц. д-р инж. С. Чаушев

Научен ръководител:

гл. ас. д-р инж. Д. Мутафчиева

Консултант:

доц. д-р Веселин Илиев

Дипломант:

Даниел Саздов фак. № ХИ0413

София, септември 2016

1.	Увод1
2.	Литературен обзор2
	2.1. Ерлифт реактори2
	2.1.1. Конструкции2
	2.1.2. Принцип на действие3
	2.1.3. Схеми на ерлифт реактори4
	2.1.4. Предимства и недостатъци6
	2.1.5. Приложение
	2.2. Хидродинамика в ерлифт реактор
	2.2.1. Режими на двуфазните потоци9
	2.2.2. Газосъдържание - основни зависимости и методи за определяне10
	2.2.3. Скорост на циркулация на течната фаза13
3.	Експериментална част15
	3.1. Описание на обекта на изследване15
	3.2. Метод на изследване15
	3.2.1. Метод на крайните елементи16
	3.2.2. Описание на използвания софтуерен продукт
	3.3. Изграждане на геометричния модел19
	3.4. Определяне типа на елементите21
	3.5. Определяне гъстотата на мрежата22
4.	Резултати и дискусия24
	4.1. Влияние на отстоянието на долния край на вътрешната тръба от барбутьора
	върху хидродинамиката на ерлифт реактора24
	4.2. Влияние на диаметъра на вътрешната тръба върху хидродинамичните
	характеристики на ерлифт реактора
5.	Заключение
6.	Изводи
7.	Използвана литература49

# Използвани означения

D <sub>k</sub>	диаметър на колона , [ mm ] ;
d <sub>e</sub>	еквивалентен диаметър , [ m ] ;
<b>F</b> <sub>s</sub>	специфична повърхност , [ ${ m m}^2/{ m m}^3$ ] ;
<b>F</b> <sub>sf</sub>	повърхност , [ m²] ;
g	земно ускорение , [ m/s <sup>2</sup> ] ;
H <sub>w</sub>	ниво на водата в колоната , [ m ] ;
H <sub>w+a</sub>	ниво на газотечната смес , [ m ] ;
Н	височина , [ m ] ;
Δh	разлика в нива , [ m ] ;
L	дължина , [ m ] ;
m <sub>a</sub>	маса на газовата фаза , [ kg ] ;
m <sub>m</sub>	маса на газотечната смес , [ kg ] ;
m <sub>w</sub>	маса на течната фаза , [ kg ] ;
Р	налягане , [ Ра ] ;
$\Delta P_r$	загуба на налягане във възходящата част , [ Ра ] ;
$\Delta P_D$	загуба на налягане в низходящата част , [ Ра ] ;
Q	разход на газа , [ Sl/h ] ;
Qr	разход на газа при работни условия , [ l/h ] ;
Uw	истинска скорост на течната фаза , [ m/s ] ;
Ua	истинска скорост на газовата фаза , [ m/s ] ;
u <sub>r</sub>	относителна скорост на фазите , [ m/s ] ;
V <sub>k</sub>	обем на колона , [ m <sup>3</sup> ] ;
v <sub>a</sub>	обем на газа, [ m <sup>3</sup> ];
vl	обем на течността , $[ m^3 ]$ ;
<b>v</b> <sub>m</sub>	обем на газотечната смес , [ ${ m m}^3$ ] ;
Wr	скорост на газотечната смес във възходящата част , [m/s];
WD	скорост на газотечната смес в низходящата част , [ m/s ] ;
Ww	приведена скорост на течната фаза , [ m/s ] ;
Wa	приведена скорост на газа , [ m/s ] ;
$\lambda_D$	коефициент на триене във възходящата част ;
$\lambda_r$	коефициент на триене в низходящата част ;
ρ <sub>a</sub>	плътност на газовата фаза ,[ kg/m³ ] ;
$ ho_w$	плътност на течната фаза , [ kg/m³ ] ;
$ ho_m$	плътност на газотечната фаза , [ kg/m³ ] ;

- *φ* газосъдържание, [ m<sup>3</sup>(газ)/m<sup>3</sup>(газ + течност) ];
- $\xi_r$  коефициент на местно съпротивление във възходящата част ;
- **ξ**<sub>r</sub> коефициент на местно съпротивление в низходящата част ;

# Гръцки символи

- *е* газосъдържанието, [-];
- μ динамичен вискозитет, [Pa.s] ;
- ρ плътност, [kg/m<sup>3</sup>];

# 1. Увод, цел и задачи

Реакционните апарати от барботажен тип имат сравнително опростена конструкция и са твърде разпространени апарати, реализиращи газотечни реакции. При тях газът посредством мехурчета преминава през слоя течност. В повечето случаи тези реактори представляват вертикални цилиндрични съдове или колони, запълнени с течност, съоръжени с барботиращо устройство в долната част. Газът се подава през барботьора във вид на мехурчета преминаващи през слоя течност. В пространството над повърхността на течността (отстойната камера), газът се освобождава от капките преди напускане на апарата. За пълното отделяне на газа от течността често се монтира допълнителна камера или допълнително устройство. За поддържане на определена температура в повечето случаи апаратът е снабден с риза или се използват изнесени топлообменници. Такъв тип реакционни апарати са особено подходящи за провеждане на бавни реакции, протичащи в кинетичната област. Такива са болшинството от реакциите в органичния синтез. В тези апарати се осигурява добър контакт на фазите и достатъчно смесване, необходимо за равномерно протичане на реакциите в целия обем. В инженерната практика обаче се налага всеки реактор да бъде индивидуално проектиран, за да покрива изискванията на конкретния технологичен процес. При това трябва да се отчита факта, че повечето технологични процеси са променливи във времето. Един широко използван подход за анализ на поведението на химичните реактори при променливи условия е компютърната симулация.

Целта на настоящата дипломна работа е да се проведе компютърна симулация на процесите в ерлифт реактор състоящ се от външна тръба с диаметър 160х3, mm и височина 2150, mm, вътрешна тръба с диаметър 70х3, mm и височина 1300, mm и газоразпределително устройство, представляващо кръгла решетка с радиус 27, mm имаща 20 отвора с диаметър 1, mm.

За постигане на поставената цел са решени следните задачи:

- Да се направи проучване за видовете ерлифт реактори, предназначение и конструктивни особености.
- По зададената технологична схема и конструктивен чертеж да се изгради 3D модел на реактора.
- Да се изследва текущото състояние по зададените работни параметри.
- Да се изследва влиянието на изменението на работните параметри върху газосъдържанието.
- Да се изследва влиянието на изменението на геометричните параметри на барботьора върху газосъдържанието.

# 2. Литературен обзор

# 2.1. Ерлифт реактори

# 2.1.1. Конструкции

Напредък в развитието спрямо реакторите с механично разбъркване и аериране представляват барботажните колони и ерлифт реакторите. Предимствата на последните две конструкции се състоят в осигуряването на по-добро пренасяне на кислород, по-добро смесване, липса на механично разбъркване и по-лесен мащабен преход.



Фиг.1. Конструкции ерлифт реактори

В зависимост от разположението на барботьора, циркулационните реактори се разделят на възходящи и низходящи. Предимно се използват реактори с възходящо движение, при които газът се въвежда в долната част на апарата, с помощта на газоразпределително устройство. Движещата сила, благодарение на която се осигурява циркулацията на течната фаза, е разликата в плътностите на аерираната и неаерираната част на реактора. При циркулационните реактори с възходящо движение се различават две конструкции: с вътрешна и с външна циркулация (Фиг. 1.). Циркулацията на течната фаза в реакторите с вътрешна циркулация (Фиг. 1.). Циркулацията на течната фаза в реакторите с вътрешна циркулация се извършва в коаксиално поставена тръба, която се нарича още вътрешна тръба. Газовата фаза се въвежда или във вътрешната тръба (Фиг. 1.а) или в пръстеновидното пространство между тръбата и стената на реактора (Фиг. 1.б). В практиката по-често се използва първият вариант. Циркулацията на течната фаза в реакторите с външна циркулация се извършва и долната част на обикновена барботажна колона (Фиг. 1.в и Фиг. 1.г).

#### 2.1.2. Принцип на действие

По принцип на действие тези реактори съдържат течна фаза, която е разделена в две вертикални зони, свързани една с друга в горната и долната част на апарата (Фиг.2). 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: циркулацията на течността влияе върху газосъдържанието в апарата, преобладаващия хидродинамичен режим , коефициентите на топло и масопренасяне и степента на смесване в реактора.



Фиг.2. Принципна схема на разположение на зоните в ерлифт реактор

От хидродинамична гледна точка ерлифт реактора е уникален в това, че газовият поток предизвиква течния поток. Резултатният циркулационен двуфазен поток предизвиква съответно проблеми в моделирането. Хидродинамиката на ерлифт реактора се изучава и моделира чрез редица изследвания главно през последните години. Най-ранното изследване е направено от (Freedman and Davidson 1969), които анализират хидродинамиката в ерлифт реакторите като използват макроскопичен моментен баланс и пренебрегват ефекта на триене.

Хидродинамичното поведение на барботажните колони и ерлифт реактори е твърде различно. Основната разлика между правотоковите апарати и ерлифт

реакторите се състои във факта, че при последните скоростта на циркулация на течната фаза зависи от дебита на газовата фаза.

# 2.1.3. Схеми на ерлифт реактори

Най-простата конструкция на ерлифт реактор е колона с централна барботажна тръба, при която имаме неравномерно разпределяна на газа по сечение на барботажната зона. Стремежът да се отстрани този недостатък довел до такава конструкция на апарата, в която барботажната тръба е секционирана с хоризонтални газоразпределителни решетки. Аналогична е конструкцията на секциониран ерлифт реактор, но с изнесена циркулационна зона, а барботажната зона е във вид на колона, секционирана с перфорирани прегради.

За конструктивно по-съвършени би трябвало да се признаят ерлифт реакторите, в които барботажните и циркулационни тръби са обединени в общ кожух. Работният обем може да се увеличава, като се използва междутръбното пространство за циркулация на течността, но при това не следва да се забравя и за увеличаване обема на зоната за барботажа, където непосредствено се извършва химическото превръщане. Това условие е изпълнено при реактори с циркулационна зона в междутръбното пространство. В такъв реактор при развита контактна междуфазна повърхност се осигуряват добри условия на разбъркване на течността, но те се препоръчват само за газотечни реакции протичащи при ниски налягания. Това ограничение е обусловено от наличието на плоски прегради, разделящи камерите на газа и топлоносителя. Ерлифт реакторите могат да бъдат различни по структура, като:

- ерлифт реактори с вътрешна циркулация internal loop
- ерлифт реактори с външна или изнесена циркулация external loop
- ерлифт реактори с прегради baffled vessels

Схемата на ерлифт реактор с вътрешна циркулационна тръба е показана на следната фигура:



Фиг.3. Схема на Internal loop- ерлифт реактор

Ерлифт реакторите с изнесена циркулация се виждат на дадената по-долу схема.



Фиг.4. Схема на External loop – ерлифт реактор

При ерлифт реакторите с външна циркулационна тръба riser и downcomer секциите представляват колони със свързани чрез допълнителни тръби дъна и

върхове, като за постигането на по-добра циркулация обикновено при този тип реактори, колоната осигуряваща възходящото движение на течността е с по-голямо напречно сечение от тази за низходящото.

Третия вид ерлифт реактори (baffled vessels) се различават с добавянето на подходящи прегради, които създават необходимите за циркулацията канали.



Фиг.5. Схема на Baffled ерлифт реактор: с преграда – Splitreactor (SR)

# 2.1.4. Предимства и недостатъци

Ерлифт реакторите имат редица предимства, като подобрено разбъркване на течната фаза, дължащо се на вътрешните и външни рециркулационни 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 биореактори, например за стандартния ферментатор са:

- Отсъствие на механично задвижвани части.
- Ниска скорост на тангенциално напрежение.
- Относително проста конструкция и поради тази причина малка вероятност за отказ.
- 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.

- Благодарение на възможността за контрол се гарантира добре дефиниран времепрестой за всички фази, включително и за твърдата (био) фаза.
- Подходящи за бавни реакции, защото позволява голям рециркулиращ поток във вътрешната или външната линия, което води до по-голям времепрестой на течността, с малък обем на реактора, сравнен с традиционните барботажни колони, които не позволяват рециркулирането на потока.
- Високи стойности на коефициентите на топло и масопренасяне.
- Ниски срязващи напрежения, типични за реакторите с разбъркване.
- Осигурява бързо и равномерно разпределение на разтворения кислород в обема на реактора, както и на останалите компоненти на реакцията.
- Може да работи при високоинтензивни режими на работа и висока степен на циркулация.
- Проста геометрия на индивидуалните части (тръби) оправдаващи използването на прости модели.
- Оптимален хидравличен диаметър и за възходящата, и за низходящата част на ерлифт реактори, затова имат ниски загуби от триене.

# Недостатъци

- Определянето на оптималната комбинация на основните конструкционни елементи и работните условия за големи промишлени съоръжения, особено при стойностите за локалното разпределение, скоростта на циркулация.
- Определянето на локалните концентрации на различните фази и разпределянето им в реактора по време.
- Изследването на хидродинамиката и поведението на фазите при силно вискозни аерирани системи.
- Мащабния преход на експериментални резултати за опростени системи към сложни промишлени биореакторни инсталации или химически процеси.

#### 2.1.5. Приложение

През последните години са извършени редица изследвания за приложението на циркулационните ерлифт реактори за провеждане на най-различни технологични процеси. Експерименталните изследвания и математичното моделиране показват, че приложението на ерлифт реакторите (ЕЛР) в процесите на химичната индустрия е много разнопосочно.

Изобщо ерлифт реакторът е много подходящ като биореактор за процеси с участието на растителни клетки (Hulst и др. 1987, Ketel 1987, Verlaan и др. 1984) и с имобилизирани биокатализатори. От тази гледна точка, в ерлифт ректорите 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. Ефективността на процеса масопренасяне е съществен за редица биотехнологични процеси и затова редица изследвания са насочени именно в тази област. Успешното проектиране и мащабиране на барботажните колони и ерлифт реакторите е трудна задача поради сложния характер на взаимодействие и смесване на фазите. Един от определящите фактори за успешното функциониране на тези реактори е масопренасянето в системата газ-течност, което от своя страна зависи от хидродинамичната картина в апарата, смесването на фазите и физикохимичните свойства на средата.

Особено подходящи са за приложение в очистването на води и при работа с многофазни системи. Но въпреки многобройните си предимства този тип биореактори се натъкват на някои важни и неизяснени проблеми касаещи циркулацията, оптималната конструкция, и нормалната им работа в широк диапазон на изменение на основните променливи за различните промишлени приложения.

Ерлифтните реактори намират приложение в най-различни области на производство. Те се използват в хранително-вкусовата промишленост (при производството на бира), също и във фармацевтичната промишленост, но наймного промишлени приложения намират при пречистването на замърсени води.

### 2.2. Хидродинамика в ерлифт реактор

#### 2.2.1. Режим на двуфазни потоци

Хидродинамиката, смесването на фазите и масопреносните параметри в газотечните реактори силно зависят от преобладаващия режим на течение на двуфазния поток. Много изследователи (Zahradník et al, 1997; Letzel et. al., 1997; Vial et. al, 2000; Ruzicka et. al, 2001; Olmos et. al, 2003; Groen, 2004, Ruthiya et. al, 2005) изучават характера на движение на потоците, които преобладават в тези реактори. Според (Groen, 2004 Camarasa et al, 1999 и Vial et al., 2001) (**Фиг. 6.**) в барботажните и ерлифт реактори съществуват следните режими:

- Хомогенен (барботажен, мехурест) поток при него газовата фаза се състои от малки мехури с приблизително еднакви размери, всеки от които се движи самостоятелно и повечето от тях във вертикална и в много малка степен в хоризонтална посока без да си пречат взаимно. обикновено е по-малка от 0,5 Скоростта на газа, m/s И взаимодействията между мехурите са слаби. При тези условия, газовите мехурчета не оказват влияние на движението на течната фаза и тя се разбърква слабо. Коалесценцията и дробенето на газовите мехури в обема е незначително и следователно размерът им се определя от типа и устройството на газоразпределителя и физичните свойства на системата газ-течност. В реактора няма интензивна циркулация.
- Турбулентен поток настъпва тогава, когато взаимодействията между издигащите се мехури започват да стават значителни. Хомогенният слой от мехури става нестабилен, появяват се много на брой струпвания на мехури, които съществуват за кратко време. Течната фаза се издига посредством големия брой струпвания на мехури и започва да циркулира – да се изкачва нагоре от центъра на колоната и да се спуска надолу в областта около стената.
- Хетерогенен режим наблюдава се тогава когато голяма част от потока от издигащи се мехури се дължи на коалесценцията между тях. Мехурите с големи размери преобладават като голяма част от тях са много деформирани. Дисперсията и обратното смесване при този режим са определящи.

 Пръстеновиден поток – дължи се на много висока скорост на газовата фаза. Газовият поток преминава през централната част на колоната, а течният, под формата на тънък слой – покрай стената.



Фиг. 6. Режим на потоците във вертикална барботажна колона според (J. S. Groen, 2004) а – хомогенен поток; b – турбулентен поток; с – смесен поток; d – тампонен поток; е – пръстеновиден поток

# 2.2.2. Газосъдържание – основни зависимости и методи за определяне

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. Взаимовръзката между работните параметри и изследваните хидродинамични параметри в ерлифт реактора са представени на (**фиг. 7**)



**Фиг.7.** Блок схема на връзката между зависимите и независимите параметри при моделиране на хидродинамиката в ерлифт реактор

Една от основните характеристики на газотечностните системи е газосъдържанието.

$$\phi = v_a / v_m$$

Осреднената стойност на газосъдържанието определя обема на газотечностната система  $v_m$ , височината на слоя от газ и течност  $H_m$  и плътността на сместа  $\rho_m$ . При допускане, че след смесването на въздуха с водата, сместа има обем равен на обема на водата и въздуха преди смесването им, за  $\rho_m$  може да се получи следния израз

$$m_m = m_w + m_a;$$

$$\rho_m = m_w / \nu_m + m_a / \nu_m ;$$

$$v_{\rm m} = v_{\rm w} + v_{\rm a}$$
;

 $\rho_{\rm m} = m_{\rm w}/(\nu_{\rm w} + \nu_{\rm a}) + m_{\rm a}/(\nu_{\rm w} + \nu_{\rm a});$ 

$$1/\rho_{\rm m} = \nu_{\rm w}/(\rho_{\rm w}\nu_{\rm w}) + \nu_{\rm a}/(\rho_{\rm w}\nu_{\rm w}) + \nu_{\rm w}/(\rho_{\rm a}\nu_{\rm a}) + \nu_{\rm a}/(\rho_{\rm a}\nu_{\rm a})$$
;

$$\begin{split} 1/\rho_{\rm m} &= 1/\rho_{\rm w} + \nu_{\rm a}/(\rho_{\rm w}\nu_{\rm w}) + \nu_{\rm w}/(\rho_{\rm a}\nu_{\rm a}) + 1/\rho_{\rm a} \ ; \\ 1/\rho_{\rm m} &= 1/\rho_{\rm w}(\nu_{\rm w} + \nu_{\rm a})/\nu_{\rm w} + 1/\rho_{\rm a}(\nu_{\rm w} + \nu_{\rm a})/\nu_{\rm a} \ ; \\ \rho_{\rm m} &= \rho_{\rm w}\nu_{\rm w}/(\nu_{\rm w} + \nu_{\rm a}) + \rho_{\rm a}\nu_{\rm a}/(\nu_{\rm w} + \nu_{\rm a}) \ ; \end{split}$$

От където се получава израза за плътност на сместа

$$\rho_{\rm m} = \rho_{\rm w}(1-\phi) + \rho_{\rm a} \phi$$

Където  $\rho_a$  е плътността на въздуха, а  $\rho_w$  е плътността на водата.

Газосъдържанието зависи както от свойствата на течността и газа, така и от техните скорости на движение.

Газосъдържанието определя още времепрестоя на газа в течността, с други думи, мехурите се нуждаят от определено време, за да преминат от разпределителя до върха на колоната.

При дизайна и мащабирането на газотечностни реактори, газосъдържанието е важен параметър. От стойността му се съди за потенциала на масопреноса, тъй като за дадена система, по-голямото газосъдържание означава по-голяма междуфазна повърхност. Колкото по-голяма е стойността на газосъдържанието, толкова повече е времепребиваването на газа в реактора, респективно времето за контакт между газа и течността в реактора.

Стойността на газосъдържанието се определя от много и различни фактори, като :

- Геометрията на реактора, като при ерлифт реакторите от особено значение е отношението на сечението на възходящата тръба към сечението на низходящата тръба;
- Дизайна на барботьора и наличието на сепаратора (при ерлифт реакторите);
- Работните променливи налягане, скорост на газа, физичните свойства на газовата и течната фаза ;

Хидродинамиката на газотечностните реактори силно зависи, както от геометричните характеристики на колоната, така и от начина на разпределение на газовата фаза (вида на барботьора). В действителност, въз основа на геометрията на колоната, могат да бъдат идентифицирани следните три различни области в колоната със съответно газосъдържание:

- Област на барботьора (газосъдържанието зависи от геометричните характеристики на барботьора);
- Област в средата на барботажната колона (газосъдържанието се контролира от циркулацията на течната фаза)
- Област в горната част на колоната (газосъдържанието е голямо благодарение на образуването на пяна над течността).

По принцип, общото газосъдържание е сума от газосъдържанията в трите области, но ако колоната е достатъчно висока, влиянието на газосъдържанието в първата и третата област е незначително и поради това стойността на газосъдържанието е близко до това в обема на колоната. Ето защо отношението височина към диаметър на колоната (**H/D**) влияе върху газосъдържанието.

Изследвания показващи влияние на налягането върху газосъдържанието, установяват, че налягането е с незначителен ефект върху газосъдържанието при хомогенен режим. В други изследвания се установява, че при по-големи разходи на газа, с увеличаване на налягането, газосъдържанието също се увеличава.

В случай на насочено движение на газотечностната фаза  $w_w$  и истинската и скорост  $U_w$ . Връзката между приведената и истинската скорост на течната фаза може да бъде изразена с газосъдържанието:

$$w_w/U_w = 1 - \varphi$$

В следствие на подемната сила, възникнала от разликата в плътностите на фазите, истинските скорости на газа и течността се различават една от друга със стойност, равна на относителната им скорост  $u_r$ . При възходящо движение на газотечностната смес :

 $u_r = U_a - U_w = w_a / \phi - w_w / (1 - \phi)$ 

а при низходящ поток:

$$u_r = U_w - U_a = w_w/(1 - \phi) - w_a/\phi$$

#### 2.2.3. Скорост на циркулация на течната фаза

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:

$$\overline{U}_{Lc} = \frac{x_c}{t_c}$$

Където  $x_c$  е дължината на треакторията на циркулация, а  $t_c$  е средно 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 (Blazej et al., 2004а; van Benthum et al., 1999). При по-нататъшно увеличение на  $U_G$  настъпва преход към основния режим на движение, при който  $\varepsilon_G$  нараства слабо, а увличането на течността в газовия поток затруднява триенето й в стените на тръбата, в следствие на което приведената скорост на течността се изменя незначително.

Скоростта на циркулация на течната фаза в зависимост от приведената скорост на газа се дава със следната зависимост (Bello et al., 1984; Merchuk, 1986; Onken и Weiland, 1983; Siegel et. al., 1986):

$$U_L = \omega U_G^v$$
 ,

където **w** зависи от геометрията на реактора и свойствата на течността, а **v** е функция на режима на потока и геометрията на реактора (Onken и Weiland, 1983). Това уравнение е чисто емпирично и няма общоприета форма на зависимостта на **w** от геометрията на ерлифт реакторите. Merchuk, 1986 и Onken и Weiland, 1983 установяват, че експонентата **v** е приблизително 0,4 в два различни по геометрия ерлифт реактора, при използването на вода като течна фаза.

# 3. Експериментална част

# 3.1. Описание на обекта на изследване

Изследванията в настоящата дипломна работа са проведени върху съществуваща ерлифт колона с вътрешна циркулационна тръба (В. Стоянов, 2015, Приложение 1). Конструкцията на колоната се състои от две тръби (**Фиг.8.**) Голяма с диаметър 160х3 mm и височина 2150 mm (1), малка с диаметър 70х3 mm и височина 1300 mm (2) и газоразпределително устройство, представляващо кръгла решетка с радиус 27 mm имаща 20 отвора с диаметър 1 mm (3). От дъното на райзера газът се въвежда през барботьор. Всички експерименти са проведени при атмосферно налягане с вода - въздух, температура 25, *С°* и дебит 5000, I/h.



Фиг.8. Схематично представяне на експерименталния барботажен реактор

# 3.2. Метод на изследване

За компютърната симулация на хидродинамичното поведение на двуфазната среда в ерлифт реактора с вътрешна тръба (**Фиг. 8.**) е използван по-долу описаният метод на крайните елементи, който е заложен в софтуерния пакет ANSYS CFX.

#### 3.2.1. 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.9. Елементи в двумерна област

Разбиване в тримерното пространство (3D) – тетраедри и паралелепипеди;



Фиг.10. Елементи в примерната 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, с която допустимата функция апроксимира търсеното решение на изходната 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 емпирични 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.

#### 3.2.2. 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.

# 3.3. Изграждане на геометричния модел

За изграждането на триизмерен (3D) модел е генериран 2D чертеж. За изчертаване на чертежа в средата на ANSYS Workbench Design Modeler са използвани някои от основните функции:

- о Line за построяване на линии
- о Circle за изчертаване на окръжност

За оразмеряване на чертежа се използват следните функции:

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



Фиг.11. 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 Extrude

е използвана за изчертаването на външната,

вътрешната тръба и барботьора.



Фиг.12. Sketch на външната, вътрешната тръба и барботьора.

Функцията Freeze • използвана за "замразяване" на телата, където е необходимо за да се избегне обединяването на тела.



Фиг.13. Замразяване на външната тръба

#### 3.4. Определяне типа на елементите

В началото е извършена компютърна симулация на процеса с мрежа (Фиг.14.) генерирана автоматично от компютърната система. Пресмятанията са извършени при максимален брой на итерациите равен на сто, като са следени кривите (Фиг.15.), показващи средно квадратичното отклонение между две итерации за налягането и количеството на движение.



Фиг.14. Елементна мрежа

Фиг.15. Криви на сходимост

Както се вижда, голяма част от кривите (**Фиг.15.**) са разположени над 1.0е-04 стойност, която обикновено се определя като желателна за 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(**Фиг.16.**).





Фиг.17.Криви на сходимост

Пресмятанията са извършени при максимален брой на итерациите равен на сто, като са следени кривите(**Фиг.17**.), които показват средно квадратичното отклонение между две итерации за налягането и количеството на движението.

# 3.5. Определяне гъстотата на мрежата

За определяне гъстотата на контролните обеми са извършени пресмятания с различен брой елементи, като за критерии е приета разликата 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 **Фиг. 18.** 





На базата на проведените анализи се установява, че при мрежа с гъстота 296 015 елемента се получават най-добри резултати. Увеличаването на броя на елементите до 777 000 не води до подобряване на разположението на 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 296 015.

# 4. Резултати и дискусия

Създаденият математичен модел и процедура за компютърна симулация на хидродинамичните процеси в ерлифт реактора с вътрешна циркулационна тръба, позволяват да бъдат получени следните резултати за:

- Разпределение на налягането
- Скоростта на водата и скоростта на газа
- Газосъдържание

в зависимост от разположението на вътрешната тръба спрямо барботьора и в зависимост от диаметъра на вътрешната тръба.

# 4.1. В зависимост от разположението на вътрешната тръба спрямо барботьора.

Проведени са числени експерименти при различно разстояние h на вътрешната тръба от барботьора, за да се установи влиянието му върху основните хидродинамични параметри на двуфазната система в ерлифт реактора. Симулациите са направени при един и същи дебит на газа (5000, l/h) като разстоянието h се променя съответно 8, mm ; 28, mm ; 48, mm ; 88,mm. На следващите фигури под формата на цветни контури са представени:

### 4.1.1. Разпределение на налягането

Създадените модел и процедура за компютърна симулация на хидродинамичните процеси позволяват да бъдат получени следните резултати:



Фиг.19. Разпределение на налягането

a) h = 8, mm	б) h = 28, mm	в) h = 48, mm	г) h = 88, mm

**4.1.2.** Разпределение на скоростта на водата по височината на колоната във вертикална равнина прекарана по диаметъра на колоната, (**Фиг.20**).



**4.1.3.** Разпределение на скоростта на газа по височината на колоната във вертикална равнина прекарана през диаметъра на колоната, визуализирано с помощта на цветен контур (**Фиг.21**).



Фиг.21. Скорост на газа

a) h = 8, mm	б) h = 28, mm	в) h = 48, mm	г) h = 88, mm
	-	-	-

**4.1.4.** Разпределение на обемния дял на водата в същата вертикална равнина, визуализирано с помощта на цветен контур (**Фиг.22**).



a	) h = 8, mm	б) h = 28, mm	в) h = 48, mm	г) h = 88, mm
	,		=/	.,

**4.1.5.** Разпределение на газосъдържанието във вертикална равнина централно разположена по диаметъра на колоната, визуализирано с помощта на цветен контур (**Фиг.23**).



Фиг.23. Газосъдържание

a) h = 8, mm б) h = 28, mm в) h = 48, mm г) h = 88, mm

Газосъдържанието е най-голямо в долната част на колоната непосредствено над барботьора, където газонасищането е максимално, което е и очакваното разпределение. Мястото на барботьора влияе на газосъдържанието непосредствено над барботьора, но се отразява по слабо на общото газосъдържание. Векторно разпределение на скоростта на водата по височина на колоната при дебит 5000, I/h, разстояние между барботьора и вътрешната тръба 88, mm и диаметър 54, mm (**Фиг. 23, Фиг. 24**).







- 1 вътрешна тръба
- 2 перфорирана плоча (барботьор)

На Фиг.23. ясно се вижда, че скоростта на водата е най-висока в долната част на вътрешната тръба. В близък план на Фиг.24. е дадена областта над барботьора, където се наблюдава завихряне. Газът увлича водата със себе си във вътрешната тръба, която е с малко сечение и скоростта се увеличава. Векторно разпределение на скоростта на газа по височина на колоната при дебит 5000, I/h, разстояние между барботьора и вътрешната тръба 88, mm и диаметър 54, mm (**Фиг. 23, Фиг. 24**).





Фиг.25. Скорост на газа във вертикална равнина



- 1 вътрешна тръба
- 2 перфорирана плоча (барботьор)

От цветните контури за вектора на скоростта на газа, представени на горните фигури се наблюдава същата тенденция както и при разпределение на скоростта на водата: скоростите са най-големи в долната част на колоната. Това е и очакваният резултат, тъй като непосредствено над барботьора скоростта на въздуха е максималната.



Фиг.27 Векторно поле на скоростта на газа в долния край на ерлифт реактора при 8, mm разстояние между барботьора и вътрешната тръба.



Фиг.28 Векторно поле на скоростта на газа в долния край на ерлифт реактора при 28, mm разстояние между барботьора и вътрешната тръба.



Фиг.29. Векторно поле на скоростта на газа в долния край на ерлифт реактора при 48, mm разстояние между барботьора и вътрешната тръба.



Фиг.30 Векторно поле на скоростта на газа в долния край на ерлифт реактора при 88, mm разстояние между барботьора и вътрешната тръба. От резултатите, показани на фигури от 19 до 30, се вижда че разпределението на скоростта на газа в долната част на колоната не се влияят значително от разстоянието между барботьора и вътрешната тръба, с изключение на най- малкото разстояние от 8mm, при което скоростите са значително по - ниски в сравнение с останалите, при един и същ дебит на газа, което се дължи на по-голямото съпротивление, което се създава при това положение на вътрешната тръба.



Фиг.31. Газосъдържание в участъци от колоната

- 1 Газосъдържанието на разстояние 0.50, т от барботьора
- 2 Газосъдържанието на разстояние 0.75, т от барботьора
- 3 Газосъдържанието на разстояние 1.00, т от барботьора
- 4 Газосъдържанието на разстояние 1.25, т от барботьора
- 5 Газосъдържанието на разстояние 1.50, т от барботьора

Резултатите на тази фигура са от числен експеримент с диаметър 54, mm и с разстояние 28, mm.

#### 4.2. В зависимост от диаметъра на вътрешната тръба

**4.2.1.** Разпределение на налягането в колоната при различен диаметър на вътрешната тръба, визуализирано с помощта на цветен контур (**Фиг.32**).



Фиг.32. Разпределение на налягането

a) $d = 11 \text{ mm}$	6) d = 54 mm	r = 64 mm	r) d – 71 mm
a) u = 44, mm	0) u = 54, mm	B/U = 04, 1111	1) u = 74, mm

**4.2.2.** Разпределение на скоростта на водата във вертикална равнина минаваща по диаметъра на колоната, (**Фиг.33**).



a) d = 44, mm б) d = 54, mm в) d = 64, mm г) d = 74, mm

Разпределение на скоростта на водата във вертикална равнина по диаметъра на колоната, визуализирано с помощта на цветен контур (**Фиг.33**).

**4.2.3.** Разпределение на скоростта на газа във вертикална равнина по диаметъра на колоната, визуализирано с помощта на цветен контур (**Фиг.34**).



Фиг.34. Скорост на газа

a	) d = 44, mm	б) d = 54	1, mm в)	) d = 64, mm г	) d = 74, mm

**4.2.4.** Разпределение на обемния дял на водата във вертикална равнина по диаметъра на колоната, визуализирано с помощта на цветен контур (**Фиг.35**).



Фиг.35. Обемни части на водата

		-) - 0.4	-) -1 74
a) a = 44, mm	0) a = 54, mm	B) a = 64, mm	$\Gamma$ ) $a = 74$ , mm

**4.2.5.** Разпределение на газосъдържанието във вертикална равнина по диаметъра на колоната, (**Фиг.36**).



Фиг.36. Газосъдържание

a	d - 44 mm	б) d = 54 mm	в) d = 64 mm	г) d – 74 mm
a	) u = 44, mm	0) u = 54, mm	B = 04, 1111	1 u = 74, mm





# Фиг.38. Векторно поле на скоростите в долния край на ерлифта

- 1 вътрешна тръба
- 2 перфорирана плоча (барботьора)

Резултатите показани на фигури 37 и 38 са при диаметър на вътрешната тръба 54, mm, разстояние на вътрешната тръба от барботьора 28, mm и дебит на газа 5000, l/h.



Фиг.39. Векторно поле на скоростта на газа в долния край на ерлифт реактора при 44 mm диаметър на вътрешната тръба



Фиг.40. Векторно поле на скоростта на газа в долния край на ерлифт реактора при 54 mm диаметър на вътрешната тръба



Фиг.41. Векторно поле на скоростта на газа в долния край на ерлифт реактора при 64 mm диаметър на вътрешната тръба



Фиг.42. Векторно поле на скоростта на газа в долния край на ерлифт реактора при 74 mm диаметър на вътрешната тръба

От резултатите, показани на фигури от 32 до 42, се вижда че разпределението на скоростта на газа в долната част на колоната се влияят значително при малките диаметри от 44, mm до 64, mm. Промяната на диаметъра на вътрешната тръба от 64, mm на 74, mm при един и същ дебит на газа, не оказва съществено влияние.

### 5. Заключение

С цел да бъде изучено влиянието:

- на диаметъра на вътрешната тръба т.е. на съотношението на сечението на низходящата към възходящата тръба на ерлифт реактора.
- на разположението на барботьора спрямо вътрешната тръба върху хидродинамичните характеристики на двуфазните потоци в ерлифт реактора, като: налягането, скоростите на газа и водата и на газосъдържанието е проведена компютърна симулация при един и същ дебит на газа и при четири различни диаметъра на вътрешната колона (44, mm, 54, mm, 64, mm, 74, mm) и при различни локализация на барботьора от дъното на колоната (8, mm, 28, mm, 48, mm, 88, mm).

За оценка на това влияние като целева характеристика, е приета средната стойност на газосъдържанието в хоризонтална равнина, отстояща на 200, mm от горния край на вътрешната тръба. Числените стойности са обработени с MSExel и са представени графично на фигура 40 и Фигура 41.



# 5.1. Влиянието на диаметъра на вътрешната тръба върху хидродинамиката на ерлифт реактора

Фиг.40. Средно газосъдържание в зависимост от диаметъра на вътрешната тръба

От графиката на фигура 40 се вижда, че при малките диаметри на вътрешната тръба средното газосъдържание в хоризонталната равнина е много по-голямо от средното газосъдържание в обема. С увеличаване на диаметъра се наблюдава рязко намаляване на газосъдържанието в изследваната равнина и увеличаване на газосъдържанието в обема.

Увеличаването на диаметъра на вътрешната тръба ще намали престоя на потока във възходящата тръба, което ще доведе до нарастване на скоростта на циркулация и до намаляване на газосъдържанито при същата хидродинамична движеща сила. Промяната на диаметъра на тръбата и на мястото на барботьора влияе и на общото триене в ерлифт апарата, което дава резултат в скоростта на течността и газосъдържанието.

# 5.2. Влияние на разположението на вътрешната тръба спрямо барботьора върху хидродинамиката на ерлифт реактора

С цел да бъде изучено влиянието на отстоянието на долния край на вътрешната тръба върху разпределението на налягането, скоростите и газосъдържанието е проведена компютърна симулация при изходните параметри на колоната и четири различни отстояния на вътрешната колона. За целева характеристика е приета средната стойност на газосъдържанието в хоризонтална равнина, отстояща на 200, mm от горния край на вътрешната тръба. Числените стойности са обработени с MSExel и са представени графично на **Фиг.41.** 



Фиг.41. Средно газосъдържание в зависимост от отстоянието

Промяната на разстоянието от барботьора до вътрешната тръба влияе позначително при промяна на резултата от 8, mm до 28, mm, по-нататъшното увеличаване от 28, mm до 88, mm, оказва слабо влияние, както се вижда от горната фигура.

# 6. Изводи

- 1. Направеното с ANSYS числено изследване на ерлифт реактор с вътрешна циркулационна тръба предсказва успешно хидродинамичното поведение в реактора.
- 2. Установено е влиянието на геометричните размери на конструкцията на реактора върху основните хидродинамични параметри, а именно:
  - 2.1 влияние на мястото на барботьора спрямо вътрешната тръба
  - 2.2 на диаметъра на вътрешната тръба

върху скоростите на газа, водата и върху газосъдържанието.

3. Получените резултати от компютърната симулация на хидродинамичното поведение в ерлифт реактора с вътрешна циркулационна тръба, са полезни и дават ценна информация за по-нататъшно изучаване и изследване на този тип реактори.

# Приложение 1



# Използвана литература:

- 1. Bello, R. A., Robinson, C. W., and Moo-Young, M., 1984, Liquid circulation and mixing characteristics of airlift contactors. Canadian Journal of Chemical Engineering, 62(5): 573-577
- 2. 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.
- Camarasa, E., Vial, C., Poncin, S., Wild, G., Midoux, N., Bouillard, J., "Influence of Coalescence Behavior of the Liquid and Gas Sparging on Hydrodynamics and Bubble Characteristics in a Bubble Column," Chemical Engineering and Proceeding, Vol. 38, (1999), pp. 329-344.
- 4. Freedman, W. and Davidson, J.F., Holdup and liquid circulation in bubble columns, Trans. Instn. Chem.Engrs1969, 47, pp.T251-T262
- 5. **Groen J.S**, 2004, Scales and structures in bubbly flows, Ph.D. Thesis. Technische Universiteit Delft.
- Hulst, A.C., Verlaan, P., Breteler, H. and Ketel, D.H., 1987, Thiophene production by Tagetes patula in a pilot plant airlift-loop reactor. Proc.4t h Europ. Congress on Biotechnology. 2, 401-404
- Letzel, H. M.; Schouten, J. C.; Krishna, R.; Van Den Bleek, C. M., (1997). Characterization of regimes and regime transitions in bubble columns by chaos analysis of pressure signals. Chemical Engineering Science, 52(24), 4447-4459.
- 8. **Merchuk, J. C.** (1986). "Gas hold-up and liquid velocity in a two-dimensional air lift reactor." Chemical Engineering Science, 41(1): 11-16.
- 9. Olmos, Eric; Gentric, Caroline; Midoux, Noel. (2003). Identification of flow regimes in a flat gas-liquid bubble column via wavelet transform. Canadian Journal of Chemical Engineering, 81(3-4), 382-388.

- 10. **Onken, U. and Weiland, P.** (1983) Airtlift fermenters: Construction, Behaviour, and uses Advances in Biotechnological Processes 1. Alan R. Liss, New York, 67-95.
- Ruthiya, Keshav C.; Chilekar, Vinit P.; Warnier, Maurice J. F.; van der Schaaf, John; Kuster, Ben F. M.; Schouten, Jaap C.; van Ommen, J. Ruud, (2005). Detecting regime transitions in slurry bubble columns using pressure time series. AIChE Journal, 51(7), 1951-1965.
- Ruzicka, M. C.; Drahos, J.; Fialova, M.; Thomas, N. H., (2001). Effect of bubble column dimensions on flow regime transition. Chemical Engineering Science, 56(21-22), 6117-6124.
- 13. Siegel, M.J., Merchuk, J.C., Schugerl, K., 1986. Airlift reactor analysis: interrelationships between riser, downcomer, and gas-liquid separator behaviour, including gas recirculation effects, AIChE Journal 32, 1585-1596.
- van Benthum, W.A.J., van der Lans, R.G.J.M., van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J.J., (1999). Bubble recirculation regimes in an internal-loop airlift reactor. Chemical Engineering Science 54, 3995-4006.
- 15. Vial, C.; Poncin, S.; Wild, G.; Midoux, N., (2001). A simple method for regime identification and flow characterisation in bubble columns and airlift reactors. Chemical Engineering and Processing, 40(2), 135-151.
- Zahradnik, J.; Fialova, M.; Ruzicka, M.; Drahos, J.; Kastanek, F.; Thomas, N. H., (1997). Duality of the gas-liquid flow regimes in bubble column reactors. Chemical Engineering Science, 52 (21/22), 3811-3826.
- 17. В. Стоянов, "Експериментално изследване на хидродинамиката в барботажен апарат", магистърска дипломна работа, ХТМУ, София, 2015 г.
- 18. **Д. Мутафчиева,** "Хидродинамични и масообменни изследвания в двуфазни системи", дисертация, ХТМУ, София, 2014 г.