



**ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН
УНИВЕРСИТЕТ**

ФАКУЛТЕТ ПО МЕТАЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ

**КАТЕДРА „ФИЗИЧНА МЕТАЛУРГИЯ И ТОПЛИННИ
АГРЕГАТИ”**

инж. ДАНИЕЛА КРУМОВА ЧОШНОВА

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

СТРУКТУРА НА ФАКЕЛА, ФОРМИРАН ПРИ ТОПЕНЕ НА СУЛФИДНИ МЕДНИ СУРОВИНИ В ПЕЩ ОУТОКУМРУ

за придобиване на образователната и научна степен „доктор” по
научната специалност „Металургична топлотехника”

НАУЧНИ РЪКОВОДИТЕЛИ:

доц. д-р инж. Борис Стефанов

доц. д-р инж. Венко Петков

НАУЧНО ЖУРИ:

1. доц. д-р инж. Иван Груев - председател и рецензент
2. проф. д-р инж. Никола Шопов - рецензент
3. проф. д-р инж. Цоло Рашев
4. проф. д-р инж. Минчо Минчев
5. доц. д-р инж. Борис Стефанов

София, 2011

Дисертационният труд е написан на 170 страници, оформен е в 6 глави, съдържа 63 фигури, и 35 таблици. Цитирани са 239 източника.

Номерата на фигурите и таблицата в автореферата съответстват на тези в дисертацията.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет на защита на заседание на разширен научен съвет на научното звено на катедра „Физична металургия и топлинни агрегати”, състояло се на 15.12.2010г.

Публичната защита на дисертационният труд ще се проведе на 23 юни 2011г. от 14,00 часа в зала 424, сграда А на ХТМУ.

Материалите са на разположение на интересуващите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности”, стая 406, сграда А на ХТМУ.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на темата

Познаването на аеродинамичните особености на потока, формиран в реакционната шахта на пещта за факелно топене е от особено значение за управление на топло- и масообменните процеси, които са в основата на технологията Outokumpu.

Днес изучаването на факела се извършва в няколко взаимно допълващи се направления:

- директни измервания на параметрите на факела провеждани на промишлени и полупромишлени инсталации;
- изчисляване на параметрите на факела чрез математични модели;
- изследвания с помощта на физични модели на действащи агрегати;
- лабораторни изследвания, моделиращи процесите на окисляване на частиците в летящо състояние;
- компютърни симулации за изследване на поведението на сулфидните частици;
- изследване на механизма на шейно- и шлакообразуване.

Все още не е създадена методика за задълбочен анализ на структурата на факела, формиран в реакционното пространство на пещта Outokumpu. Не са ясно дефинирани местоположението и ролята на зоните с рецикулация на потока. Голяма част от получените резултати в тази насока са противоречиви и не позволяват да се изгради цялостна представа за аеродинамичната картина в реакционната шахта.

Основно направление в дисертационната работа е провеждането на изследвания, свързани с определяне на скоростното поле в реакционната шахта на пещта за факелно топене с акцентиране върху рецикулацията на потока. Това е тема, за която все още данните в техническата литература са ограничени и тяхната интерпретация има дискуссионен характер.

Проблемите, възникващи в резултат на рецикулацията на потока, които се наблюдават при работата на пещта Outokumpu, са свързани с образуване на налепи по вътрешните стени на агрегата, висок прахоунос, загуби на мед с шлаката в резултат на преокисляването ѝ и др.

Използваният при настоящото изследване софтуерен продукт Ansys успешно се прилага за определяне на пряко неизмерими величини в реални условия (скоростно, температурно и др. полета). Чрез него се анализират ламинарни и турбулентни потоци, в които протичат горивни реакции. Намира широко приложение при съвременните изследвания.

Обосновка на необходимостта от изследването

1. Неравномерността на скоростното поле при ограничено струйно течение на една или повече струи не е изучена достатъчно, поради влиянието на рециркулационните обеми. Не е възприет единен методичен подход за тяхната оценка. Трудностите са породени от липсата на адекватно и пълно описание на физикохимичните, топлофизичните и кинетичните процеси протичащи в условията на високотемпературен хетерогенен факел и краткото време на престой на частици с автономно поведение в разглежданата среда.

2. Точното местоположение на условно разделените от някои автори структурни зони на факела в пещта Outokumpu не може да се установи по изчислителен път, а високите температури в реакционната шахта и интензивността на преносните процеси са причина за трудности при снемане на производствени данни. Поради невъзможността да се пресъздаде реалната ситуация, не може да се осъществи лабораторно изследване с гореща струя. Затова предложеното моделно изследване със студена (моделираща) струя и симулацията на горивния процес и скоростното поле с програмния пакет Ansys CFX-10 дават една адекватна картина на аеродинамиката в реакционната шахта на пещта.

3. В техническата литература има ограничен брой трудове, в които са представени изследвания на рециркулацията на шихтовъздушния поток. Всички забелязани публикации разглеждат топлофизичната същност на проблема, но не се отчита напълно турбулентният характер на течението. Авторите изказват хипотези относно влиянието на рециркулацията върху окисляването на частиците, а не върху структурата на потока.

4. Непосредствените измервания на скоростното поле върху работещи промишлени пещи е невъзможно поради трудности, свързани с измервателната апаратура, комплицираната характеристика на потока, високата скорост и високата температура. Затова изложените в специализираната литература разработки са малко на брой и са посветени на решаването на проблеми, свързани с химизма

на взаимодействията и състава на крайните продукти - щейн, шлака, газова фаза.

5. Представените в литературата методи за механично въздействие върху потока с цел интензифициране на преносните процеси в него не позволяват да се даде теоретична основа, която да е от полза за инженерната практика.

6. При работата на факелната пещ Outokumpu един от основните показатели, които се следят в хода на топилния процес е скоростта на газовата фаза, която от своя страна зависи от времето на престой на сулфидните частици в реакционната шахта и от насрещните циркулиращи потоци.

7. Ако се установи структурата на факела и поведението на частиците в него, могат да се управляват и да се оптимизират горенето на сулфидната шихта и топло- и масообменът в реакционната шахта на пещта.

8. Определянето на обемите в реакционната шахта, където съществуват рециркулиращи потоци, може да е от полза при проектиране и усъвършенстване на шихтовите горелки.

Цели и задачи на изследването

Изложеното в литературния обзор и представената обосновка доказват, че аналитичното описание и експерименталното изследване на движението на потока в реалната пещ е свързано с трудности поради комплексния характер на процесите, протичащи в реагиращата среда. Направените анализи дадоха основание да се формулират следните **цели** на работата.

1. Изследване структурата на факела, формиран в реакционната шахта на пещ Outokumpu.

2. Определяне местоположението на зоните с рециркулация на потока и изследване влиянието им върху структурата на факела.

За постигане на поставените цели е необходимо да се решат следните **задачи**:

1. Проучване на изследванията свързани с изучаване на аеродинамиката в реакционния обем на факелната топилна пещ Outokumpu.

2. Конструирание на лабораторна инсталация, представляваща физичен модел на реакционната шахта на пещта.

3. Установяване на условията за формиране на рециркулация в обема на лабораторната инсталация.

4. Аналитично изследване на структурата на факела, формиран в пещи, работещи с една и с четири шихтови горелки.

5. Експериментално определяне на скоростното поле в обема на физичния модел.

6. Създаване на симулационна процедура за визуализация на скоростното поле в лабораторната инсталация.

7. Създаване на симулационна процедура, включваща горене на сулфидна частица, за визуализация на скоростното поле в обема на реалната пещ.

Избраният подход на комбиниране на лабораторния експеримент с компютърно симулиране на движението на потока дава възможност да се определи разположението на рециркулиращите обеми в реакционната шахта на пещта Outokumpu.

Реализирането на поставените цели, по наше мнение, може да послужи за:

- ✓ прецизиране на изследванията, свързани с изучаване на физикохимичните и топлофизичните процеси в реакционната шахта;
- ✓ предотвратяване на някои проблеми, възникващи в резултат на негативното влияние на високотемпературния поток в реакционната шахта;
- ✓ усъвършенстване на практиката на технологичния процес топене на сулфидна шихта чрез контролиране на устойчивостта на факела и др.

Представяне на резултатите от дисертационния труд

Основните резултати в дисертационния труд са преставени и докладвани на следните форуми:

1. IXth Proceedings International Metallurgy and Materials Congress, Instambul, 11-15 june 1997.
2. Международна конференция „Ефективно използване на енергията в металургията”, Варна 22-24 юни 1999.
3. Юбилейна научна конференция с международно участие “50 години ХТМУ”, ХТМУ- гр. София, 4-5 юни 2003.
4. Първи международен семинар “Металургична топлотехника” София, 3-4 ноември 2003.
5. X^{та} национална конференция по металургия с международно участие, Варна 28-31 май 2007.
6. IXth International Conference New Trends in Fatigue and Fracture “Failures of materials and structures by fatigue and fracture”, Belgrade, october 12-14, 2009.
7. IV-та научна постерна сесия за студенти, докторанти и млади учени, ХТМУ гр.София, май 2007.

8. VI-та научна постерна сесия за студенти, докторанти и млади учени “Науката за устойчиво развитие по време на икономическа криза”, ХТМУ гр.София, 21 май 2009.
9. VII-ма научна постерна сесия за млади учени “125 години от рождението на проф. д-р Асен Златаров”, ХТМУ гр.София, 19 май 2010.
10. Изложение ”Младежко иновационно творчество”, ТУ-гр. София, 20 май 2010.

II. КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

За да се обхване разглежданият проблем, предложеното в дисертацията литературно проучване е структурирано в три глави и включва анализ на литературни източници в следните насоки:

- ✓ обща характеристика на автогенните технологии за добив на мед от сулфидни концентрати;
- ✓ характеристика на факела, формиран в реакционната шахта на факелната пещ Outokumpu;
- ✓ анализ на влиянието на броя и вида на шихтовите горелки върху структурата на факела;
- ✓ анализ на специфичните особености при движението на потока в реакционната шахта на пещта;
- ✓ характеристика на различните методи за теоретично изследване на факела.

Представената литературна справка върху проблемите свързани със структурата на факела показва, че те не са решени напълно. Основните изводи от направения обзор са формулирани по следния начин:

1. Факелът, формиран при топенето на сулфидни медни концентрати в летящо състояние, е с нееднородна структура и неговото изучаване и анализиране е свързано с трудности, породени от сложната аеродинамична ситуация в реакционната шахта на факелната пещ Outokumpu. Разделянето му на отделни зони е условно.

2. Видът и броят на шихтовите горелки оказват съществено влияние върху аеродинамиката в реакционната шахта на пещта. Формоизменението и смесването на струите са явления, които определят структурата на потока. Те са съпроводени с горенето на частиците и изследването им при реалната пещ е невъзможно.

3. От изложения преглед на теоретичните изследвания на факела, включващ физично и математично моделиране и компютърно

симулиране на хидродинамичните, физикохимичните и топлофизичните процеси може да се обобщи следното:

- повечето физични модели, представени в литературата, са с опростена конструкция и силно облекчена процедура за тяхното функциониране;
- изследванията с физични модели на шихтови горелки се използват за изучаване на разпръскването на концентрата, а тези на реакционната шахта - за изследване на физикохимичните взаимодействия в нея. Лабораторните инсталации са с малки размери и не позволяват високи скорости на потока;
- не са открити физични модели, чрез които да се изследва скоростното поле и взаимодействието между струите;
- конструктивните особености на полупромишлените инсталации не могат да позволят пълно развитие на факела в тях, работят с една шихтова горелка и в цитираните източници не са представени данни относно структурата на факела поради трудности при измерване на скоростта в изследвания обем;
- повечето от теоретичните разработки са осъществени с помощта на числено моделиране при опростяване на конструкцията на агрегата;
- за симулиране на движението на потока в реален агрегат е необходим голям капацитет на компютърната техника и набор от многообразна информация;
- представените математични модели и компютърни симулации облекчават интерпретирането на експерименталните резултати, полезни са при установяване на важните променливи влияещи върху топилния процес и са база за прогнозиране, проектиране и оптимизация на технологията;
- представените математични модели, въз основа на които са направени компютърни симулации се фокусират върху определени аспекти от процеса. В тях се съдържат значителен брой емпирични константи, които са различни за всеки конкретен случай с цел опростяване на симулацията. Имитирани са предимно ламинарни потоци в опростена среда за изследване на отделни физични характеристики на компонентите от потока;
- по отношение на аеродинамиката на реакционното пространство се разглежда главно областта под изходящия отвор на горелката и основния участък на струята. За структурата на струята се съди само по хипотези, а рециркулационните обеми не са обект на изследване. При проследяване на скоростното поле са използвани

фотографски техники, не е приложено директно измерване на параметрите на потока.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЧАСТ

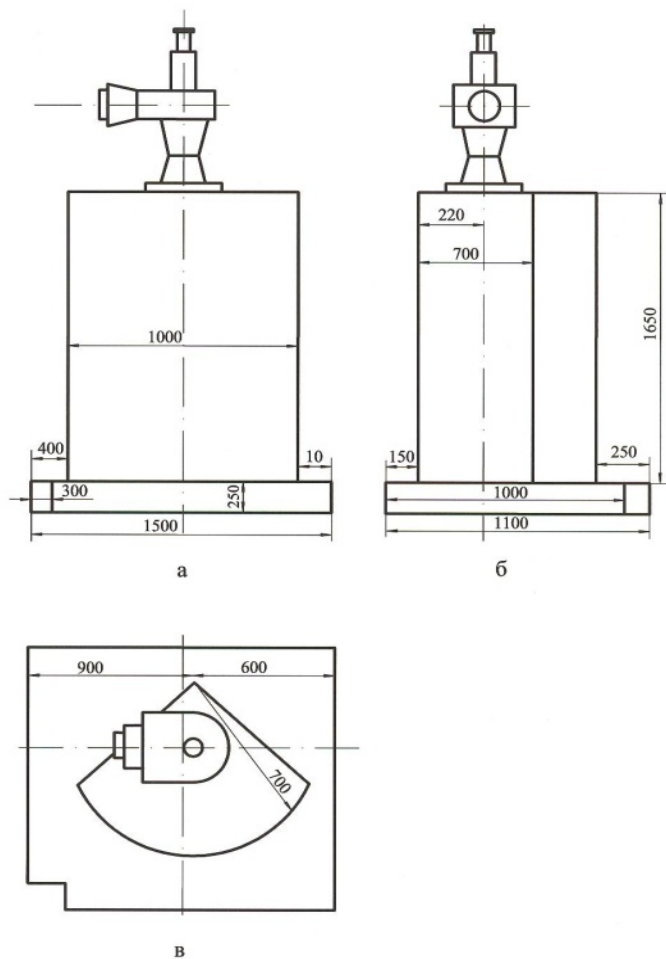
Глава IV: ПОСТАНОВКА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

Обект на изследването: Обект на представеното изследване е факелът, формиран в реакционната шахта на пещ Outokumpu, работеща с четири шихтови горелки. За целта е построен физичен модел на $\frac{1}{4}$ от реакционната шахта на пещта с модел на шихтова горелка към него в мащаб 1:5. Избран е този подход на конструиране на инсталацията, защото позволява да се анализира структурата на потока при работа на една шихтова горелка. Разположението на двете плоски ограничителни стени на инсталацията отговаря на областта, в която се срещат две съседни струи, а ръбът ѝ съответства на оста на симетрия на реакционната шахта.

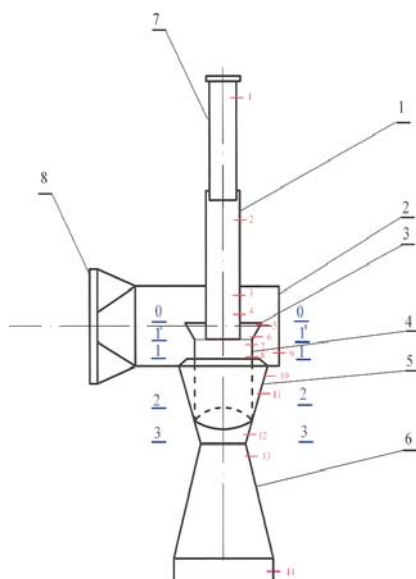
Схема на лабораторната инсталация: На *фигури 8* е представена обща схема на лабораторната инсталация, а на *фигура 10* е показана схема на модела на шихтовата горелка.

Изследване на аеродинамиката при движението на потока във физичния модел на шихтовата горелка. Определяне на автомоделната област

За да се установят възможностите за пренасяне на получените експериментални резултати от физичния модел върху оригиналната горелка, първоначално е определена автомоделната област, като са изчислени стойностите на критерия на Рейнолдс и критерия на Ойлер при различни обемни дебити на потока. Доказано е, че за всички сечения, разположени след входното, моделирането може да се проведе, тъй като стойностите на критерия на Рейнолдс са в границите на т.нар. втора автомоделна област.



Фигура 8: Схема на лабораторната инсталация
а- изглед отдясно, б- изглед отпред, в- изглед отгоре



Фигура 10: Схема на горелката

1-централна тръба, 2-въздушна камера, 3- конфузорна наставка, 4-цилиндрична камера, 5- дифузорно-конфузорна конструкция, 6- дифузорна наставка, 7,8- въздухопроводи

Изследвано е разпределението на статичното налягане в обема на физичния модел на шихтовата горелка при свободно изтичане и при изтичане в обема на инсталацията с и без херметизиране на шихтовия отвор. Доказано е, че:

- ✓ избраната конструкция на шихтовата горелка е подходяща за симулиране на движението на потока в реалната горелка;
- ✓ с намаляване на дебита на моделиращият флуид, се понижават загубите на налягане в изследваните сечения;
- ✓ херметизирането на шихтовия отвор в двата варианта не оказва влияние върху крайните резултати.

Определяне на условията за формиране на рециркулация в обема на лабораторната инсталация

Изследвано е изменението на статичното налягане по стените на лабораторната инсталация в следните случаи:

- с и без херметизиране на шихтовата тръба и горелка, разположена централно спрямо изходящия отвор на инсталацията;
- с и без херметизиране на шихтовата тръба и горелка, разположена странично спрямо изходящия отвор на инсталацията.

Констатирано е наличие на възвратен поток, насочен към стените на физичния модел. При експериментите без херметизиране на шихтовия отвор са забелязани някои изменения в разпределянето на статичното налягане, които са следствие от засмукване на вторичен въздух. Като резултат е установено понижаване на средната скорост на потока. Определено е, че стойностите на параметъра в подсводовото пространство са по-високи в сравнение с тези от експериментите проведени с херметизиране на шихтовия отвор. Това се дължи на смесването на основния със засмукания поток. От експеримента, проведен при странично разположена горелка спрямо изходящия отвор е установено, че основните закономерности запазват качествения си характер, а в количествено отношение се наблюдават някои изменения, дължащи се на промяна в траекторията на потока.

След направени консултации е взето решение следващите изследвания и компютърната симулация да се проведат при херметизиране на шихтовата тръба на горелката, тъй като този вариант в по-голяма степен се доближава до действителната ситуация.

Изследвано е изменението на статичното налягане в обема на лабораторната инсталация. Установено е, че:

- ✓ основното ядро на потока се движи в условията на висок положителен градиент на статичното налягане;
- ✓ в периферната и в централната област на лабораторната инсталация съществуват условия за формиране на рециркулационни зони.

Представеното изследване в тази част на дисертационната работа е публикувано в [230].

ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА IV

1. Получените резултати и направените анализи от лабораторния експеримент с физичния модел на шихтовата горелка могат да се използват за изследване на аеродинамичния режим на работа на реална горелка, тъй като е постигната автомоделност на течението.

2. Получените резултати при определяне на статичното налягане по плоскостите, ограждащи изследвания обем, доказват наличието на физически условия за формиране на рециркуляционни зони.
3. Установеното неравномерно разпределение на статичното налягане в радиално направление в зоните близо до околните стени и в пониските сечения на физичния модел е доказателство, че съществуват условия за формиране рециркуляционни зони в обема на инсталацията.
4. Представената конструкция на лабораторната инсталация може да се използва за моделиране на скоростното поле в реакционната шахта на факелната пещ Outokumpu. Избраният подход при физичното моделиране позволява да се анализира аеродинамиката в пещ, работеща с една и с четири шихтови горелки.

Глава V: ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ОПРЕДЕЛЯНЕ НА СКОРОСТНОТО ПОЛЕ В ОБЕМА НА ЛАБОРАТОРНАТА ИНСТАЛАЦИЯ

Аналитично определяне на разположението на рециркуляционните зони при работа на една или четири шихтови горелки

За определяне на обема на реакционната шахта, който се запълва от хетерогенния факел и съответно големината и разположението на зоните с рециркуляция са изчислени параметрите на формираните струи по височина на реакционната шахта на разстояния 6; 10; 12; 18; 24 *калибъра* от изходното сечение на горелката с диаметър $d_0=370 \text{ mm}$. За да се даде по-пълна аеродинамична картина и да се направят изводи относно влиянието на рециркуляцията върху структурата на технологичния факел са изчислени геометричните размери на струите за пещ, работеща с една шихтова горелка и за моделиращата струя. Резултатите от изчисленията са представени в **таблица 7**. Диаметърът на струите за съответните сечения е определен с представената в дисертацията методика.

При работа на четири шихтови горелки е установено, че до *калибър 6* струите се развиват самостоятелно и не си взаимодействат. Взаимодействие е възможно при *калибър 10*. До тази височина четирите факела могат да се разглеждат като свободни струи. При *калибър 18* е възможно взаимодействие между две струи, образувани от две срещуположни горелки и след него се формира общ факел, в който скоростта постепенно се осреднява. Взаимното влияние на струите се изразява в промяната на разпределението на скоростта по височината на реакционната шахта.

Таблица 7: Геометрични размери на струите, формирани в пещ с една и пещ с четири шихтови горелки и в лабораторната инсталация

Калибър (K)	Пещ с четири шихтови горелки			Пещ с една шихтова горелка			Физичен модел		
	d_K	F_K	l_K	d_K	F_K	l_K	d_K	F_K	l_K
0	0,37	0,1075	-	0,45	0,1590	-	0,074	0,0043	-
6	1,02	0,8167	2,22	1,24	1,2070	2,70	0,204	0,0327	0,444
10	1,59	1,9845	3,70	1,93	3,1743	4,50	0,318	0,0794	0,740
12	1,91	2,8637	4,44	2,32	4,2252	5,40	0,382	0,1145	0,888
18	2,86	6,4210	6,66	3,48	9,5148	8,10	0,572	0,2568	1,332
24	3,82	11,4502	8,88	4,64	16,9153	10,80	0,764	0,4580	1,776

В **таблица 7** d_K е диаметърът на струята в съответния калибър, m ; l_K – разстоянието от изходното сечение на горелката до напречното сечение, отговарящо на съответния калибър, m ; F_K – площта на напречното сечение на струята, m^2 . Калибърът се изразява с отношението: $K=l_K/d_0$.

Получените размери на струите в реакционната шахта на пещта, работеща с четири шихтови горелки, позволяват да се определят зоните, където е възможна рециркулация на потока. Интензивността на рециркулацията се определя преди всичко от скоростта на изтичане на шихто-въздушния поток от горелката. С най-големи размери е обемът в близост до стените на реакционната шахта, който обхваща и подсводовото пространство. Зоната с рециркулация, разположена между срещулежащите струи в централната част на шахтата, оказва влияние върху относителната скорост между частиците и газовата фаза и върху формирането на зоната на интензивно горене в реакционната шахта.

От практиката е известно, че с намаляване на производителността на агрегата, се понижава средното време на престой на частиците в летящо състояние. Този резултат се обяснява с понижаване на интензивността на циркулационните потоци в реакционната шахта.

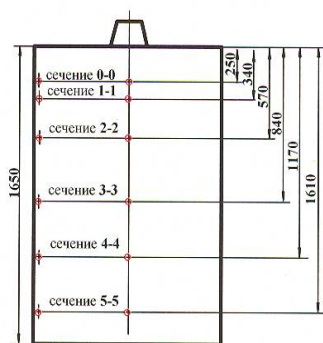
В пещ, работеща с една шихтова горелка, струята заема по-малко пространство от реакционната шахта. Зоната с рециркулация е разположена само в подсводовото пространство и границите между факела и стените на реактора. Основното предимство на използването на една горелка при факелното топене е, че агресивното въздействие на струята върху зидарията е значително по-малко. Областта, където е констатирано наличие на рециркулация, е по-голяма като обем и

скоростта в нея би следвало да бъде по-ниска в сравнение с тази при използване на четири шихтови горелки. От друга страна скоростта на движение на основния поток е значително по-висока, което намалява вероятността за преокисляването на сулфидните частици, тъй като времето им на престой в реакционната шахта се намалява.

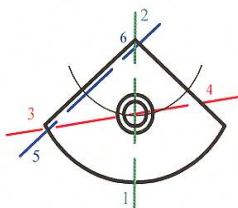
Направеният анализ в тази част на дисертационната работа е публикуван в [233, 236].

Измерване на динамичното налягане в обема на лабораторната инсталация

Схемата на напречните сечения, в които е определена скоростта на моделиращия флуид, е показана на **фигура 25а**. Измерванията на динамичното налягане са проведени в три посоки в радиално направление (1-2, 3-4 и 5-6), както е показано на **фигура 25б**



а



б

при централно и странично разположение на горелката спрямо изходящия отвор на инсталацията. От получените резултати е изчислена скоростта на моделиращия флуид във всяка една от точките, в които е определено динамичното налягане. За отделните сечения е представено разпределението на скоростта в графичен вид на **фигури 27-32**.

Фигура 25:

Схема на позициите, в които е измерено динамичното налягане в радиална посока
а-схема на сеченията; б- схема на посоките в радиално направление

Анализ на резултатите за горелка, разположена централно спрямо изходящия отвор на инсталацията

На **фигура 27** е показано скоростното поле при измерване през централните отвори на околната стена на модела (*посока 1-2, фигура 25*). Оста на струята се пресича на разстояние 380 mm от околната стена. До *сечение 4-4* на разстояние 1170 mm от изхода на горелката или на разстояние около 5 m от изходния отвор на свода на пещта за факелно топене се запазва характерната форма на скоростния профил. В обема под това сечение се наблюдава повишаване на скоростта в посока към околната стена на модела и скоростният профил се измества в тази посока.

До *сечение 3-3* на разстояние 840 mm от изходния отвор на горелката се формира рециркуляционна зона. Под това сечение рециркулация не се наблюдава, а струята взаимодейства с околната стена на инсталацията. Само в тази част на реакционната шахта на реалната пещ, между съответната шихтова горелка и околната стена не е възможно взаимодействие между струите, формирани от две съседни горелки. До тази височина физичният модел може да бъде използван за определяне на скоростното поле на поток, създаван от една шихтова горелка.

В зоната между оста на струята и оста на реакционната шахта, която при модела се намира на разстояние 700 mm от околната стена се вижда, че по цялата височина съществува циркулация на потока, като най-силно тя е изразена в *сечение 0-0*, разположено на разстояние 250 mm от изхода на горелката.

На **фигура 28** е показано изменението на скоростното поле при измервания, проведени през страничните отвори (*посока 3-4, фигура 25*). Оста на струята се пресича на разстояние около 550 mm от околната стена и потокът достига срещуположната странична стена на инсталацията. В зоната между страничния околнен ръб на инсталацията и струята се наблюдава рециркулация до *сечение 1-1*, като най-силно тя е изразена в областта до основния поток. След *сечение 4-4* отново има рециркулация, която обаче е резултат от формоизменението при контакт между две съседни струи. В областта между две съседни струи единствено над *сечение 1-1* се установява рециркуляционна зона, а под това сечение се наблюдава изменение на скоростния профил, характеризиращо се с постепенно повишаване на средната скорост в посока от оста на струята към стената. Тя оказва благоприятно влияние върху възможността за интензивно взаимно смесване на две съседни струи в реалната пещ.

За да бъде обхванат целият изследван обем, са направени измервания на скоростта по страничната плоска стена на инсталацията. На *фигура 29* са представени скоростните профили по височина на инсталацията в *направление 5-6 (фигура 25)*. Наблюдават се две области с рециркулация, разположени над и под *сечение 3-3*. Непосредствено под свода в *сечение 0-0* се наблюдава рециркулационна област с най-добре изразен характер. Очевидно е, че до и след *сечение 3-3* се развиват два самостоятелни рециркулационни вихъра - първият, разположен в свободното пространство между струите в реалната пещ, а вторият е резултат от формоизменението на потока при контакта между струите.

Въз основа на представените експериментални резултати, отнасящи се за двете шихтови горелки, които са разположени централно спрямо отстойната зона на оригиналната пещ, може да бъде определено обемното разположение на рециркулационните зони, създавани от тези горелки. На първо място резултатите потвърждават наличие на рециркулационни зони на разстояние 340 mm от свода на модела (около 2 m от свода на реалната пещ), които обхващат пространството около основния поток в зоните между две съседни струи, околната стена и струите, и в централната част на реакционната шахта. В областта до околната стена на физичния модел се формират възходящи потоци между *сечения 0-0* и *3-3*, както и между *сечения 3-3* и *5-5*. Прекъсването по височина на рециркулационния поток в *сечение 3-3* е причинено от аеродинамичните смущения, които се предизвикват при достигането на границата на основната струя до околната стена на шахтата. По цялата височина на инсталацията съществува рециркулационна зона между струята и граничния ръб, което отговаря на оста на симетрия на реалния обект. Според нас, тя е основната причина за интензивно окисляване на шихтата, защото осигурява много добро смесване и достъп на кислород до сулфидните частици.

Анализ на резултатите за горелка, разположена странично спрямо изходящия отвор на инсталацията

На *фигура 30* са отразени скоростните профили при измерванията през централните отвори в околната стена на модела (*посока 1-2, фигура 25*). Тези резултати потвърждават направения по-горе анализ, че до *сечение 3-3* струята запазва характерния си скоростен профил. Може да се предполага, че до тази височина във факела при реални условия съществува ядро с постоянна маса, която се развива самостоятелно. В областите до околната стена и околния ръб на инсталацията се наблюдава рециркулация, която е характерна

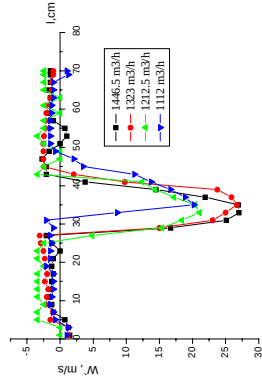
за цялата височина на инсталацията и отслабва с увеличаване на разстоянието от изходящия отвор на горелката. След *сечение 2-2* профилът на скоростта се измества към околната стена и обемът на основния поток съществено се нараства.

На *фигура 31* са показани резултати от измерванията през страничните отвори на околната стена (*посока 3-4, фигура 25*). Установено е, че най-голяма като обем рециркулация се наблюдава между оста на струята и страничната плоска стена на модела. Наблюдава се аналогично изместване на струята, но в по-малка степен.

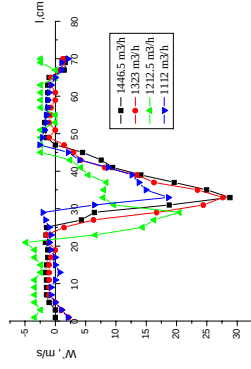
Получените резултати от измерването по *направление 5-6* са представени графично на *фигура 32*. Очевидно е, че независимо от разположението на шихтовата горелка спрямо изходящия отвор в областта до плоските стени на инсталацията се формират рециркулационни зони до и след *сечение 3-3*. Известни отклонения, които не са определящи за анализа, се наблюдават при по-нисък обемен дебит на флуида. Много вероятно е потокът да формира две рециркулационни зони, съответно към околната стена и към граничния ръб на лабораторната инсталация.

Получените резултати от втората серия експерименти позволяват да се определи разположението и посоката на рециркулационните зони. Както и при централно разположената шихтова горелка, бяха установени интензивни рециркулационни зони, обхващащи пространството между околната стена и конусовидната повърхност, която се образува между нея и основния поток. Може да се предполага, че в горната част на реакционната шахта на пещта Outokumpu между струите и околните стени се формира една обща рециркулационна зона с голям обем, който е резултат от вихрообразуването при движението на четирите струи. В нея скоростта е висока и се увеличава вероятността от среща между сулфидните частици, част от които са окислени и се намират в течно състояние. Според нас, престоят на частиците в тази зона е свързан с преокисляването им (образуване на меден окис и магнетит).

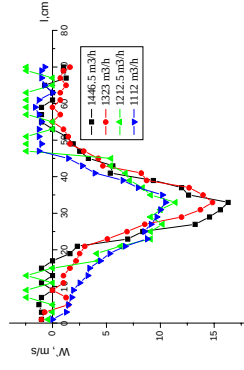
С развитието на четирите струи, все по-малки стават обемите, в които е възможна рециркулация. В областта, в която съществува взаимодействие между две съседни струи (3,7 m от свода на реакционната шахта), се установяват възходящи потоци до околната стена на реактора. Посоката на движение на вихъра е от стената към основния поток. Тъй като рециркулиращият поток идва от области с



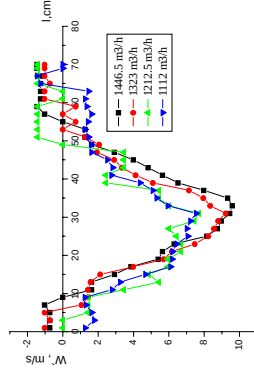
сечение 0-0



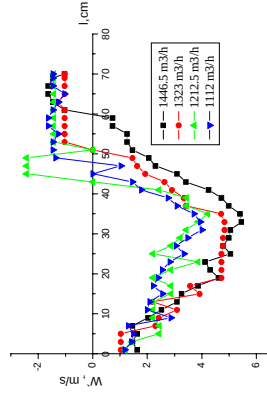
сечение 1-1



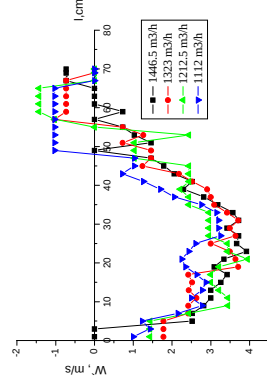
сечение 2-2



сечение 3-3

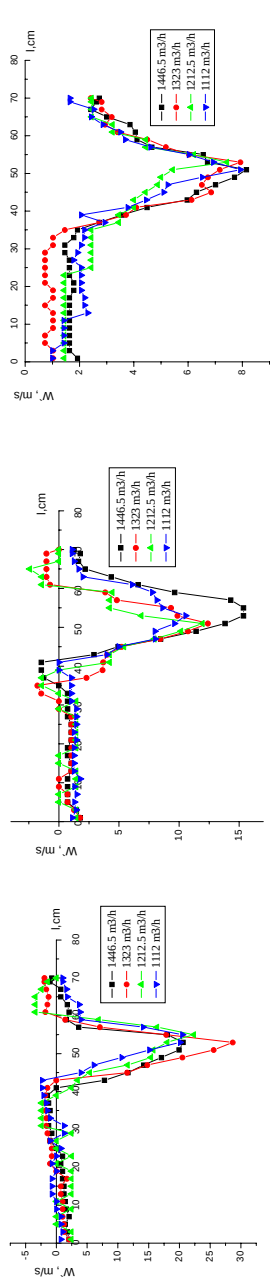


сечение 4-4



сечение 5-5

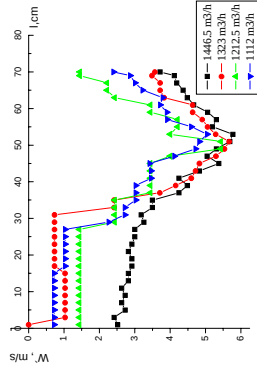
Фигура 27: Изменение на скоростта при централно разположена горелка спрямо изходящия отвор при измервания в направление 1-2



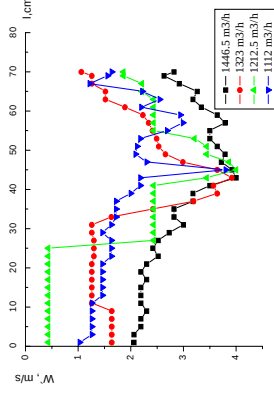
сечение 0-0

сечение 1-1

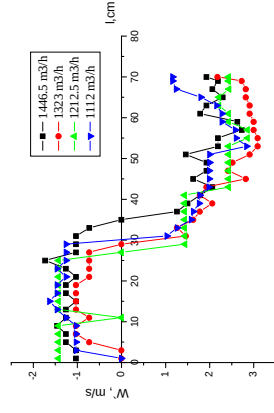
сечение 2-2



сечение 3-3

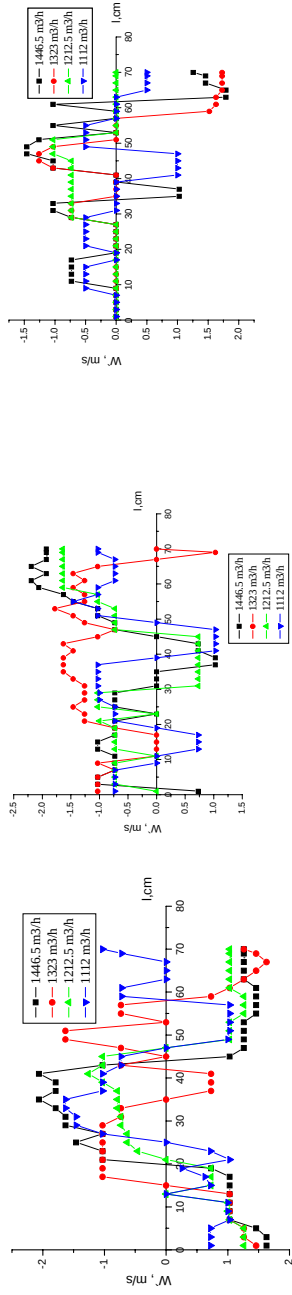


сечение 4-4



сечение 5-5

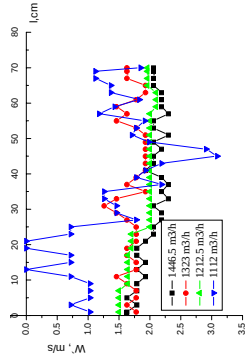
Фигура 28: Изменение на скоростта при централно разположена горелка спрямо изходящия отвор при измервания в направление 3-4



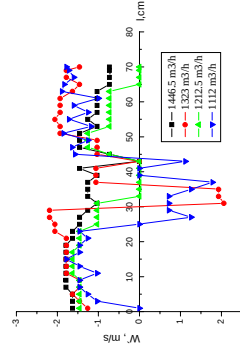
сечение 0-0

сечение 1-1

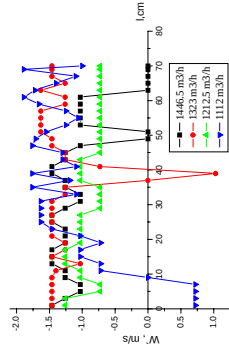
сечение 2-2



сечение 3-3

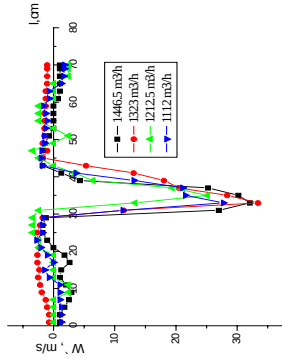


сечение 4-4

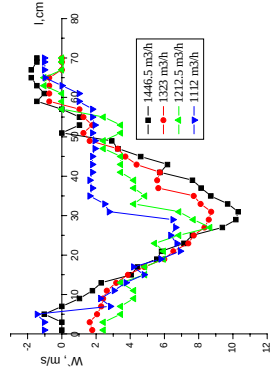


сечение 5-5

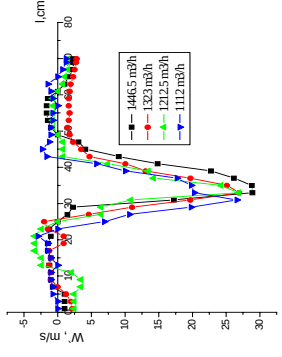
Фигура 29: Изменение на скоростта при централно разположена горелка спрямо изходящия отвор при измервания в направление 5-6



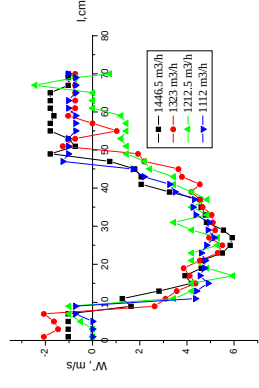
сечение 0-0



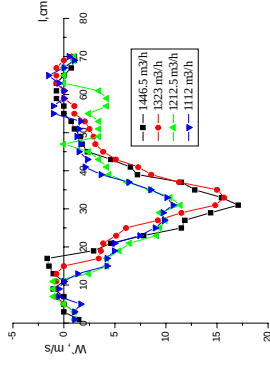
сечение 3-3



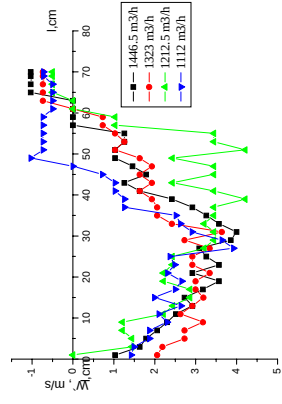
сечение 1-1



сечение 4-4

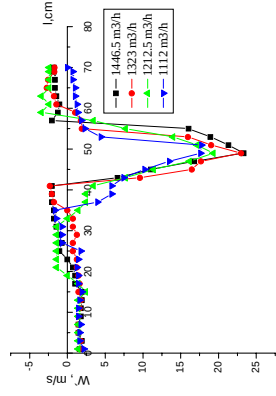


сечение 2-2

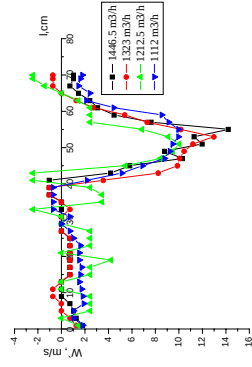


сечение 5-5

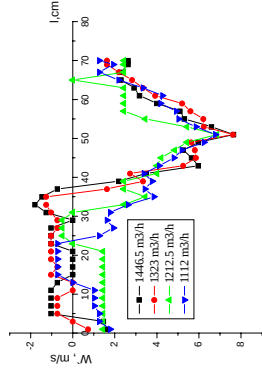
Фигура 30. Изменение на скоростта при странично разположена горелка спрямо изходяция отвор при измервания в направление 1-2



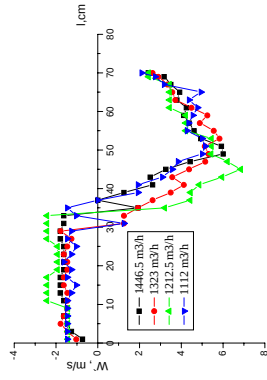
сечение 0-0



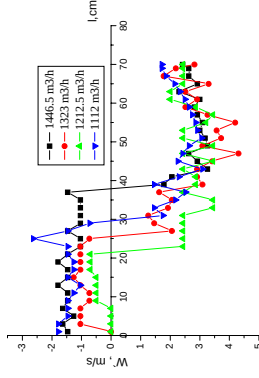
сечение 1-1



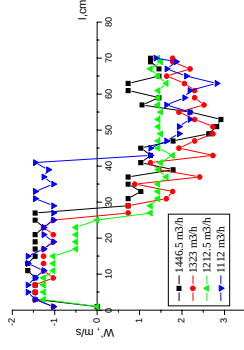
сечение 2-2



сечение 3-3

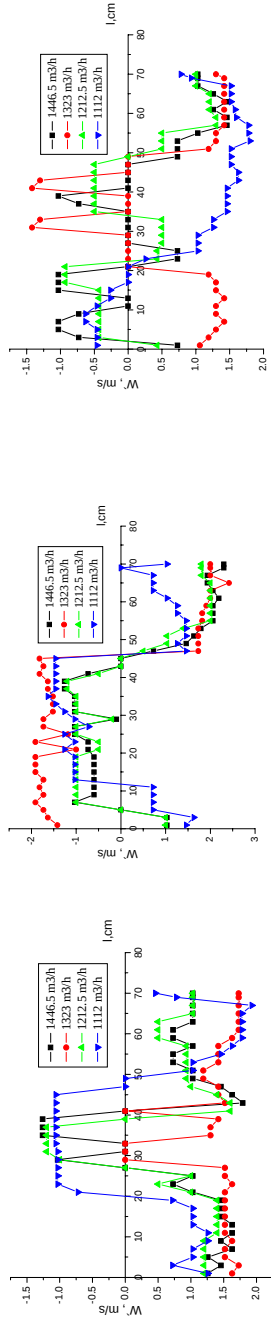


сечение 4-4



сечение 5-5

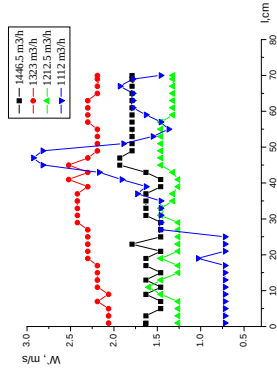
Фигура 31: Изменение на скоростта при странично разположена горелка спрямо изходящия отвор при измервания в направление 3-4



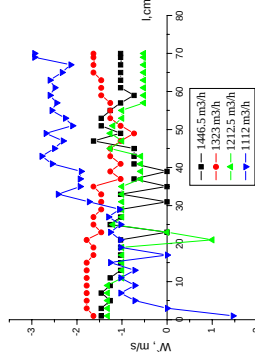
сечение 0-0

сечение 1-1

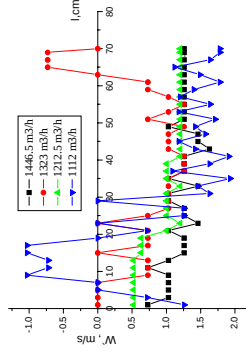
сечение 2-2



сечение 3-3



сечение 4-4



сечение 5-5

Фигура 32: Изменение на скоростта при странично разположена горелка спрямо изходящия отвор при измервания в направление 5-6

по-високи температури, то смесването му с основния поток би могло да е една от причините за високоскоростно течнoфазно окисляване на сулфидните частици. Следователно, още в началото при развитието на шихтовъздушните струи се установява приток на горещ дисперсен поток, който представлява основния топлоносител, инициращ началото на технологичните процеси. Рециркулационната зона, образувана до стената на реакционната шахта, близо до изходящия отвор, спомага за увеличаването на прахоуноса с газовата фаза.

Направеният анализ в тази част на дисертационната работа е публикуван в [235].

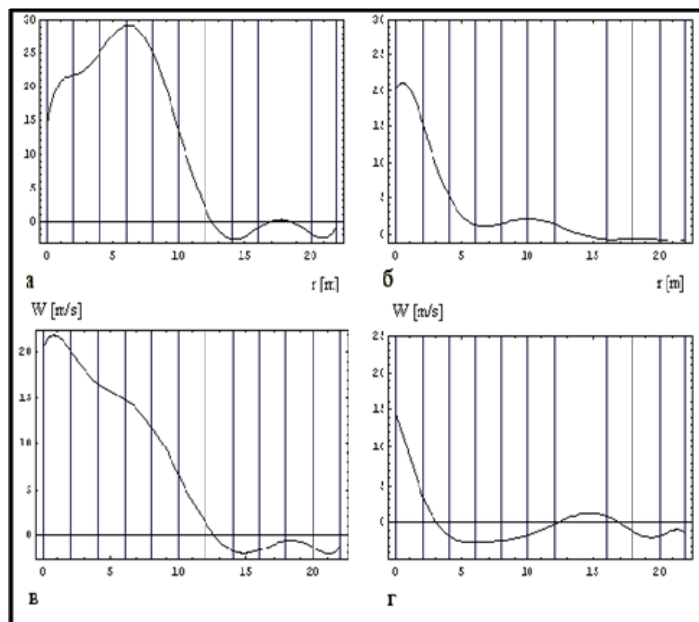
Метод за представяне на скоростното поле в обема на лабораторната инсталация

Представен е нов подход за обработване на данните от експеримента, с цел визуализация на скоростния профил. В областите, в които няма измерена стойност на скоростта, тя е определена по математичен път чрез полиномна интерполация. За работна система е избрана цилиндричната координатна система. Центърът на изходящия отвор на горелката е приет за централна точка, около която са построени концентрични окръжности. Всяко едно от напречните сечения е разделено на сектори, както следва:

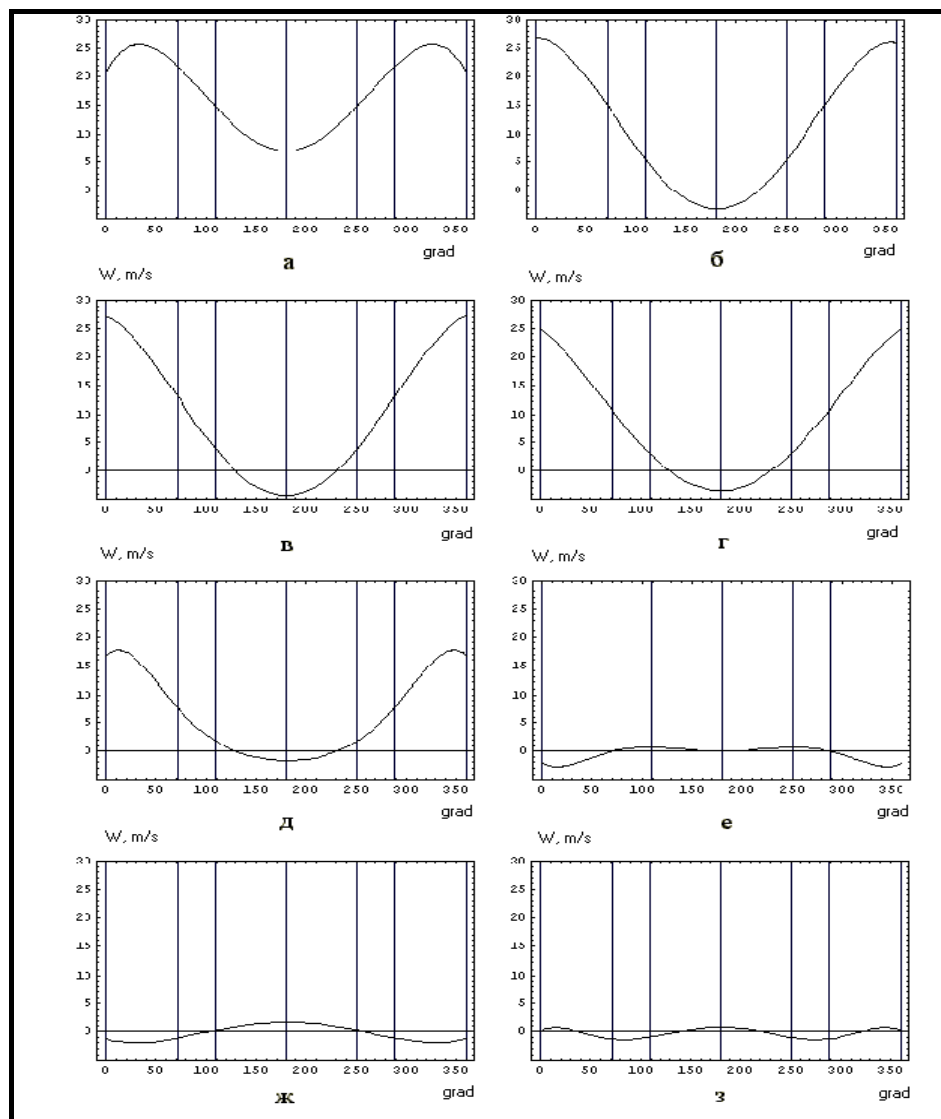
- ✓ направлението от центъра на горелката към околната стена на инсталацията, означено с ъгъл $0\ (360)^\circ$;
- ✓ направлението от центъра на горелката към ъгъла сключен между двете плоски стени на инсталацията, означено с ъгъл 180° ;
- ✓ направленията от околните ръбове през центъра на горелката към двете плоски стени - съответно 71° , 251° и 289° , 109° .

За всички изследвани сечения са съставени таблици, включващи данните от експеримента, които са обработени с помощта на математичния програмен продукт Mathematica 4.1. При изчисляването на стойностите за скоростта е избрана стъпка в радиална посока през 2 cm , а в аксиална посока през ъгъл 20° .

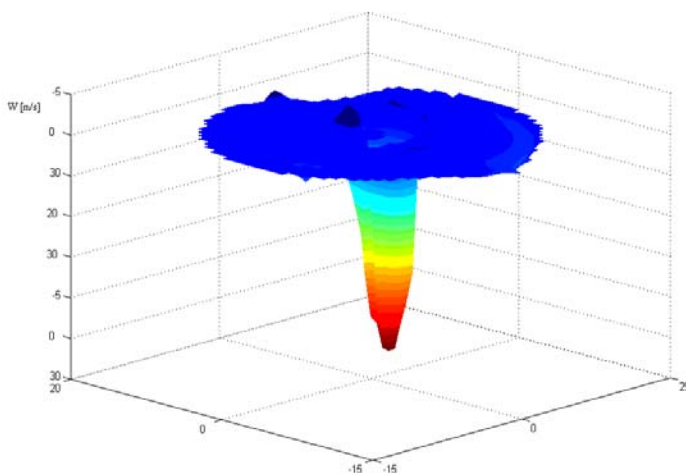
Получени са ходографи на скоростта в аксиално и в радиално направление. Зоните, в които кривите пресичат абсисната ос, са областите с рециркулация на потока. Резултатите за сечение $0-0$ на лабораторната инсталация са представени на *фигури 33* и *34*. Обобщена пространствена картина на профила на скоростното поле за това сечение е представена на *фигура 35* с помощта на програмният продукт Maple 6.0.



Фигура 33: Ходограф на скоростта за сечение 0-0 в аксиално направление
а– $\alpha = 0^\circ/360^\circ$; б– $\alpha = 71^\circ/289^\circ$; в– $\alpha = 180^\circ$; г– $\alpha = 109^\circ/251^\circ$



Фигура 34: Ходограф на скоростта за сечение 0-0 в радиално направление
а- $r=2$ cm; б- $r=4$ cm; в- $r=6$ cm; г- $r=8$ cm; д- $r=10$ cm; е- $r=12$ cm; ж- $r=14$ cm; з- $r=16$ cm



Фигура 35: Скоростен профил за сечение 0-0

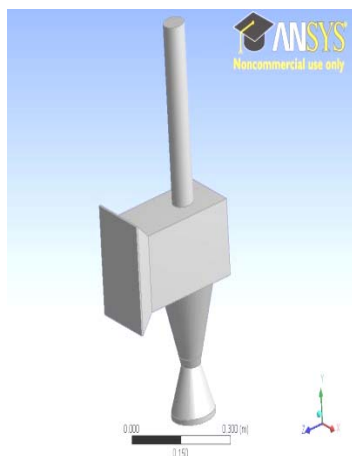
Представеният математичен метод е възможно да се приложи за всяко сечение в подобни системи, за които са известни данни за скоростта или температурата. Публикуван е в [232].

Компютърно симулиране на движението на моделиращия флуид в обема на лабораторната инсталация

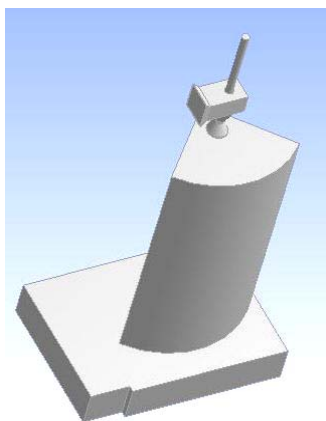
За илюстриране на скоростното поле в обема на лабораторната инсталация е създадена симулационна процедура в средата Ansys 12.0 Workbench CFX, а за визуализация на движението на потока е използвана средата Ansys 5.5. Избран е стандартен (κ - ϵ) - модел на турбулентност.

Условия за еднозначност: На *фигура 36* и *фигура 37* са представени геометричните модели на шихтовата горелка и лабораторната инсталация. Началните условия включват:

- ✓ дебит на потока - $2000 \text{ m}^3/\text{h}$;
- ✓ температура на въздуха - $25 \text{ }^\circ\text{C}$;
- ✓ размер на входното сечение на горелката - $200 \times 200 \text{ mm}$;
- ✓ стените на лабораторната инсталация са приети за абсолютно гладки повърхности.

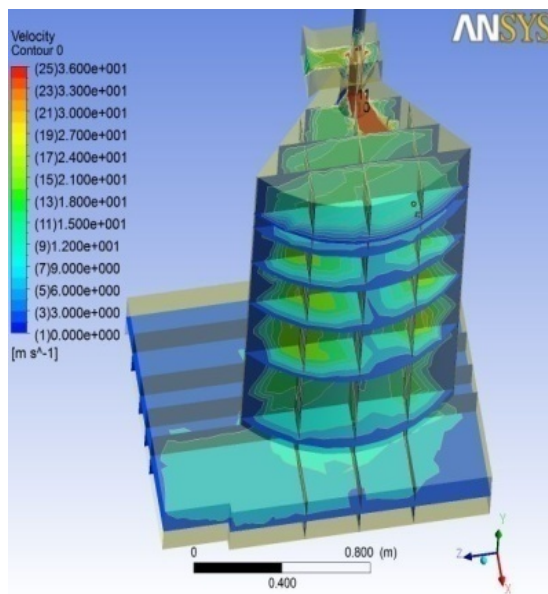


Фигура 36: Геометричен модел на шихтовата горелка



Фигура 37: Геометричен модел на лабораторната инсталация

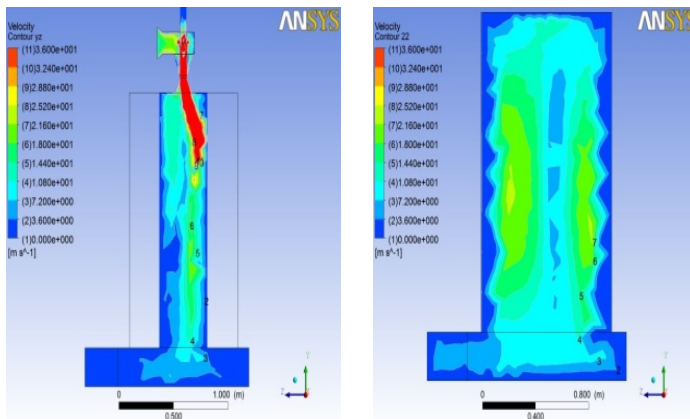
Общият вид на изследваните равнини е показан на **фигура 38**. Като цяло получените резултати от симулацията отговарят на очакваната тенденция за развитието на струята.



Фигура 38: Общ вид на изследваните равнини

На **фигура 41** са показани илюстрации на скоростното поле в аксиално направление, които потвърждават наличие на области с ниски скорости до околните стени на инсталацията. На **фигура 42** са показани резултати за скоростното поле в изследваните напречни сечения. Те доказват, че области с ниски скорости се наблюдават до околните стени на инсталацията по цялата ѝ височина. Това са зоните, където е налична рецикулация. Въздействието ѝ върху основното ядро на потока е след *сечение 1-1*.

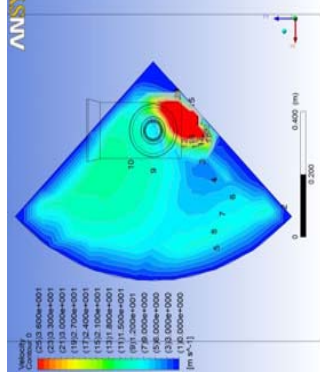
На **фигура 44** е представено движението на потока в лабораторната инсталация - обособеното ядро на струята, преходната област и зоните с рецикулация.



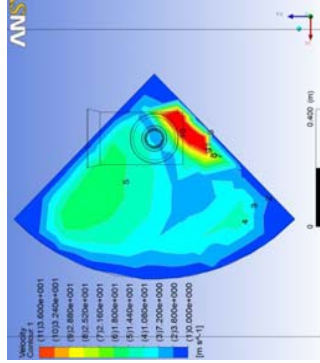
Фигура 41: Илюстрация на движението на въздушния поток при странично разположена горелка спрямо изходящия отвор на инсталацията
а- в сечение по оста на горелката, б- в сечение до околната стена на инсталацията



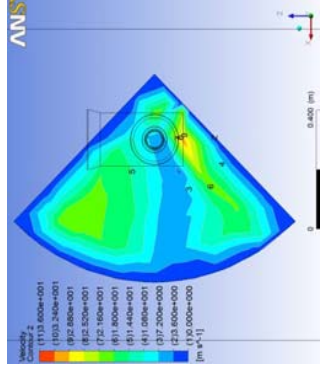
Фигура 44: Илюстрация на движението на потока във физическия модел



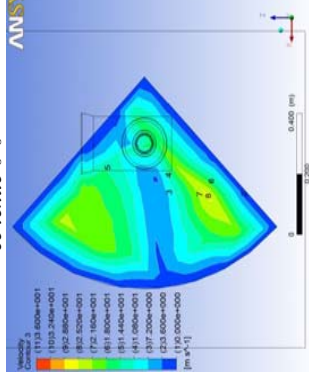
сечение 0-0



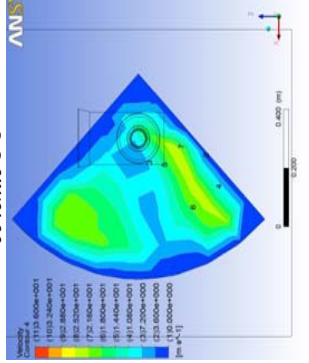
сечение 1-1



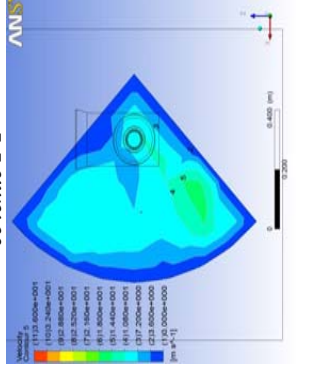
сечение 2-2



сечение 3-3



сечение 4-4



сечение 5-5

Фигура 42: Илюстрация на скоростното поле по височина на лабораторната инсталация

ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА V

1. Представеният анализ на аеродинамичните параметри по височина на реакционната шахта позволява да се направят хипотези относно разположението на рециркулиращите обеми в реакционната шахта на пещ, работеща с една и четири шихтови горелки.

1.1. Установени са обемите в лабораторната инсталация и реакционната шахта на реалната пещ, където е възможно да се развият рециркуляционни потоци, а именно:

- ✓ в подсводовото пространство;
- ✓ в областта между две съседни струи;
- ✓ между струите и околните стени на реакционната шахта;
- ✓ между срещуположно разположените струи в централната част на реакционната шахта.

1.2. Установени са следните закономерности:

✓ при използване на четири шихтови горелки, формираните струи до определена височина се развиват свободно, пресичат се, взаимодействат помежду си и изменят формата си. Скоростното поле на факела постепенно се осреднява. Рециркулиращите обеми по периферията на струите заемат по-малко пространство. От друга страна се създава възможност за рециркулация по оста на реакционната шахта. Непрекъснатото въздействие на рециркулацията върху струите води до интензивно смесване между вихрите и основния поток;

✓ при една шихтова горелка факелът заема по-малко пространство обем от реакционната шахта, по-стабилен е, поради което скоростта на потока е значително по-висока. Този факт съществено се отразява върху технологичният процес, като в резултат от по-краткото време на престой на частиците в реакционния обем се намалява вероятността за преокисляването им. Високата скорост, с която потокът достига отстойната зона, съществено намалява прахоуноса и облекчава режима на работа на прохогоуловителните и топлоутилизационните съоръжения. Рециркулиращите обеми по периферията на струята заемат по-голямо пространство, скоростта в тях е по-ниска, което спомага за устойчивостта на факела.

2. В съответствие с получените резултати от лабораторните експерименти са установени три качествено различни в аеродинамично отношение зони:

✓ Ядро на струите, което се развива самостоятелно без да присъединява или отдава маса от околната среда. То се запазва на

разстояние около 3,5 *m* от свода на шахтата, след което се деформира под действието на рециркулацията;

✓ Преходна зона, разположена около ядрото на струите, в която се движи възходящ поток. Интензивните рециркулиращи потоци постепенно проникват в целия обем на струите;

✓ Зони с рециркулиращи потоци.

3. На базата на направените анализи са формулирани следните хипотези за характера на рециркулационните зони в реакционната шахта на реалната пещ:

➤ От свода на реакционната шахта в посока отстойната зона на пещта на разстояние около 3 *m* се развиват рециркулационни зони между границите на четирите струи и околна стена на шахтата. Разположението на тези зони е непосредствено до струите, а посоката на движение в тях е към стените на шахтата.

➤ В рециркулационните зони, разположени между две съседни струи посоката на движение е обратна на основния поток, като те се разделят на две части- едната част се насочва към околната стена, а втората към оста на симетрия на реакционната шахта.

➤ След контакт между две съседни струи съществува рециркулационна зона, в която посоката на движение е към централната част на реакционната шахта. Между потока и околната стена отново съществува рециркулационна зона, която е с по-малки размери и е резултат от формоизменението на струите.

➤ В централната част на реакционната шахта се формира рециркулационна зона, която съществува от свода до срещата между две срещуположни струи. В тази зона рециркулацията е най-силно изразена.

4. Представен е нов подход за обработване на експериментални резултати и изобразяване на скоростен профил, който позволява с голяма точност да се представи скоростното поле в различни сечения.

5. Симулирано е движението на потока в лабораторната инсталация. Получено е добро сходство между резултатите от лабораторния експеримент и компютърната симулация. Симулационната процедура би могла да се адаптира за целите на обучението на студенти по дисциплината «Факелни технологични процеси».

Глава VI: КОМПЮТЪРНО СИМУЛИРАНЕ НА ДВИЖЕНИЕТО НА ПОТОКА В РЕАКЦИОННАТА ШАХТА НА ПЕШТА ОУТОКУМРУ, ВКЛЮЧВАЩО ГОРИВЕН ПРОЦЕС НА СУЛФИДНА ШИХТА

Представено е компютърно симулиране на горивен процес на сулфидна шихта в средата Ansys CFX 10.

Прието е, че твърдите частици са равномерно разпределени в потока и са със сферична форма, както и с една и съща едрина - 100 μm . Симулираният процес включва разпръскване на шихтата, нейното окисляване и превръщането ѝ в продукти от горенето. Радиационният пренос на топлина е изчислен на базата на свойствата на участващите в процеса фази и се задава като отделни коефициенти на абсорбция, емитиране, разсейване и турбулентност, чрез включен в пакета радиационен модел.

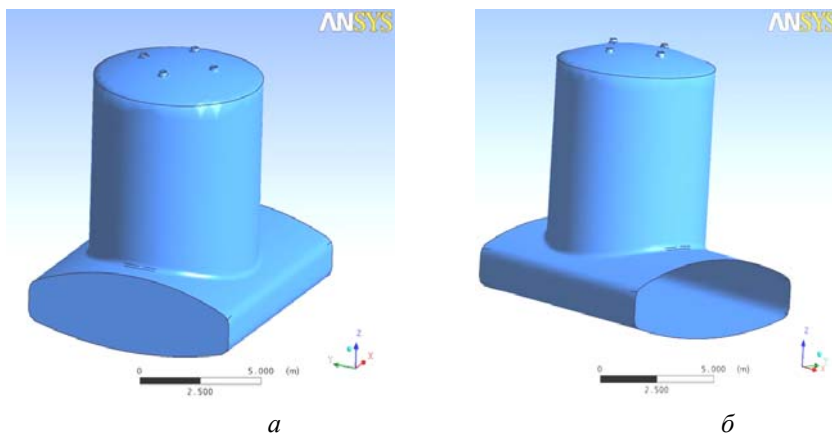
Представеното изследване е публикувано в [234].

Турбулентен модел: Избран е стандартен ($k-\epsilon$) - модел, характеризиран в специализираната литература като най-използвания и универсален модел за симулиране на турбулентни течения. За крайните елементи от построенията мрежа, които са в близост до стената на обекта, е избран т.нар. *логаритмичен закон за профила на скоростта в турбулентните течения*. Преносните коефициенти, които изисква процедурата, са изчислени по предложените в техническата литература уравнения.

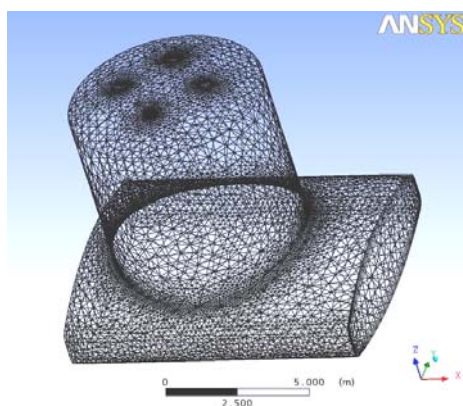
Радиационен модел: Избран е *PI* радиационен модел, който се прилага при симулации на движещи се потоци, в които възникват реакции на горене.

Горивен модел: В средата, в която е осъществена симулацията се предлагат пет варианта на горивни модели. След направен анализ на представените варианти се взе решение да се използва *Eddy Dissipation Model (EDM)* - *модел с отчитане на турбулентността*, който е разработен за приложение при изследване на предварително смесени турбулентни реагиращи потоци. Той е най-удачният модел при подобни изследвания, при които скоростта на химичната реакция е сравнително висока. От гледна точка на кинетиката не се контролира химичната реакция и е възможно да се предскажат процеси, като възпламеняването на сулфидите например. Във физичните условия, описващи горивния процес се задават предварително изчислени стойности на активизиращата енергия и предекспоненциалния фактор в уравнението на Арениус.

Условия на еднозначност: Геометрията на изследвания обем е представена в реални размери на **фигура 45**. Елементната мрежа е показана на **фигура 46**.



Фигура 45: Геометричен модел на реакционната шахта на пещта
а- тяло; б- тяло, изглед откъм изходящия отвор



Фигура 46: Елементна мрежа

Симулираният горивен процес е представен с реакцията $2CuFeS_2 + 4O_2 + SiO_2 = Cu_2S + Fe_2SiO_4 + 3SO_2$, и следните параметри на потока:

- ✓ коефициент на динамичен вискозитет: $4,064 \cdot 10^{-6} Pa.s$;
- ✓ коефициент на топлопроводност: $2,24 \cdot 10^{-4} W/(m.K)$;
- ✓ масов дебит на потока: $150 t/h$ шихта ($41,67 kg/s$);
- ✓ обемен дебит на окисляващия поток: $40000 m^3/h$ при 50 % кислород в потока ($11,11 m^3/s$);
- ✓ плътност: $3,75 kg/m^3$;
- ✓ радиационни характеристики: коефициент на разсейване: $0,13 m^{-1}$, коефициент на отразяване: 1, коефициент на абсорбция: $0,4 m^{-1}$;

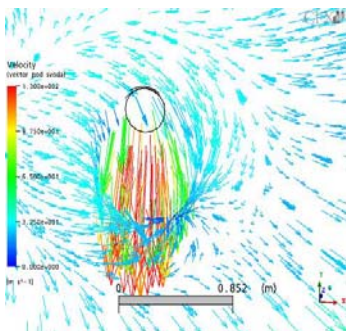
Физичните характеристики на компонентите от потока са определени чрез програмата *HSC Chemistry 4.0*.

Начални и гранични условия:

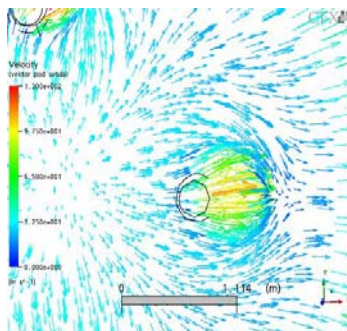
- ✓ начален общ дебит на вход в изследвания обем: $36,7567 m^3/s$;
- ✓ обща площ на входното сечение на горелките: $0,2827 m^2$;
- ✓ площ на изходното сечение: $22,1137 m^2$;
- ✓ масов дял на компонентите на вход в реакционната шахта: халкопирит: 0,350, кислород: 0,265, азот: 0,265, флюс: 0,120;
- ✓ стени на изследвания обект - поради сложността на топлообмена и специфичните особености на изграждане на зидарията и охлаждащите елементи, преносът на топлина от потока през стените на пещта не е изследван, стените са приети за адиабатни граници;
- ✓ избрана е 5 % интензивност на турбулентността;
- ✓ зададено е 2 s време на престой на частиците в реакционната шахта.

Резултати от симулирането на скоростното поле на изход от горелките

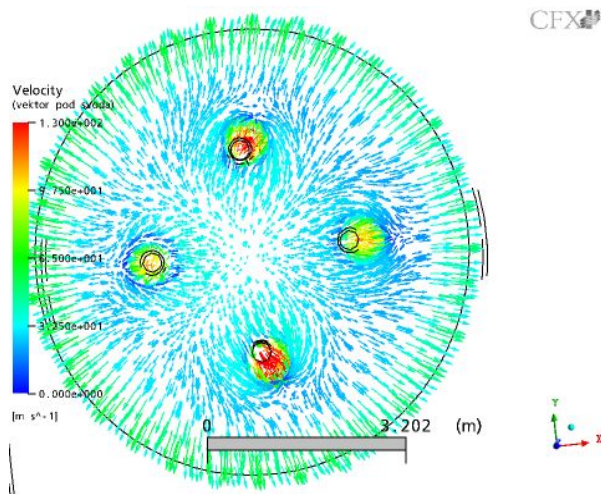
На **фигура 48** е представена илюстрация на завихрянето на потока на изход от горелките, в подсводовото пространство на реакционната шахта, а на **фигура 49** - илюстрация на завихрянето на потока от една и две горелки при минимална гъстота на векторите на скоростта. Анализът на тези фигури показва, че непосредствено под свода на реакционната шахта се формират четири мощни вихрови зони около изхода на самите горелки, които заемат целия обем под свода на модела.



a



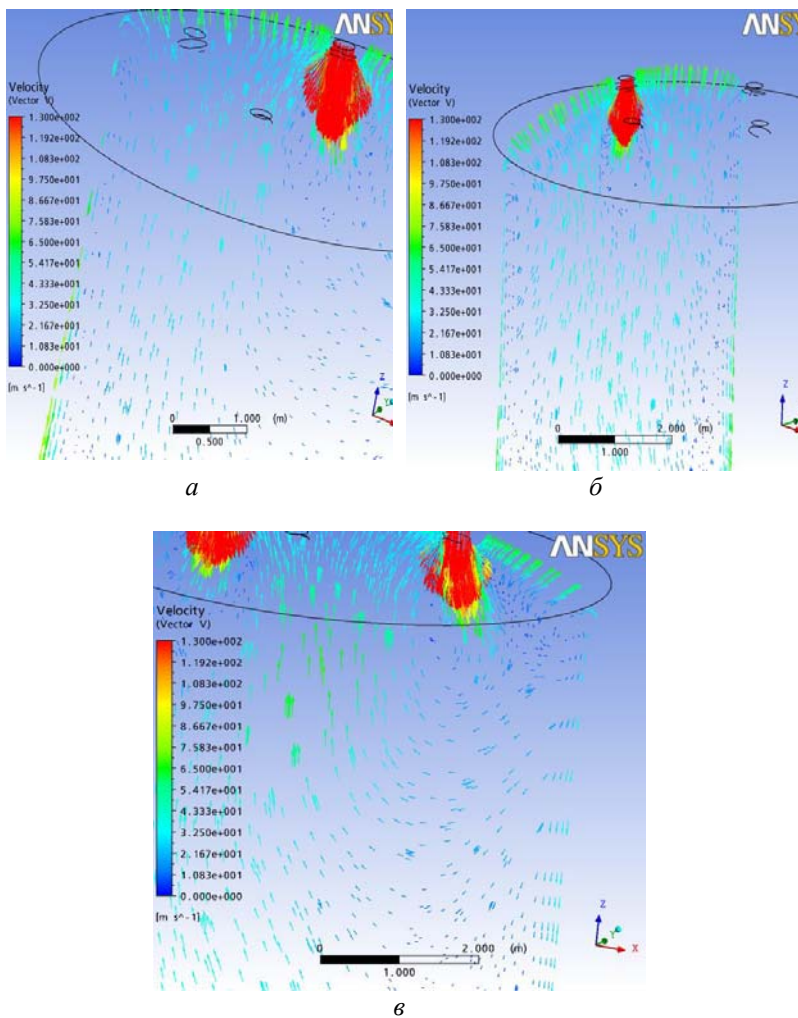
б



в

Фигура 48: Завихряне на потока на изход от горелките в подсодовото пространство на реакционната шахта в радиално направление

a, б- завихряне на потока при работа на една горелка; *в-* векторно изображение на завихрянето на потока в подсодовото пространство



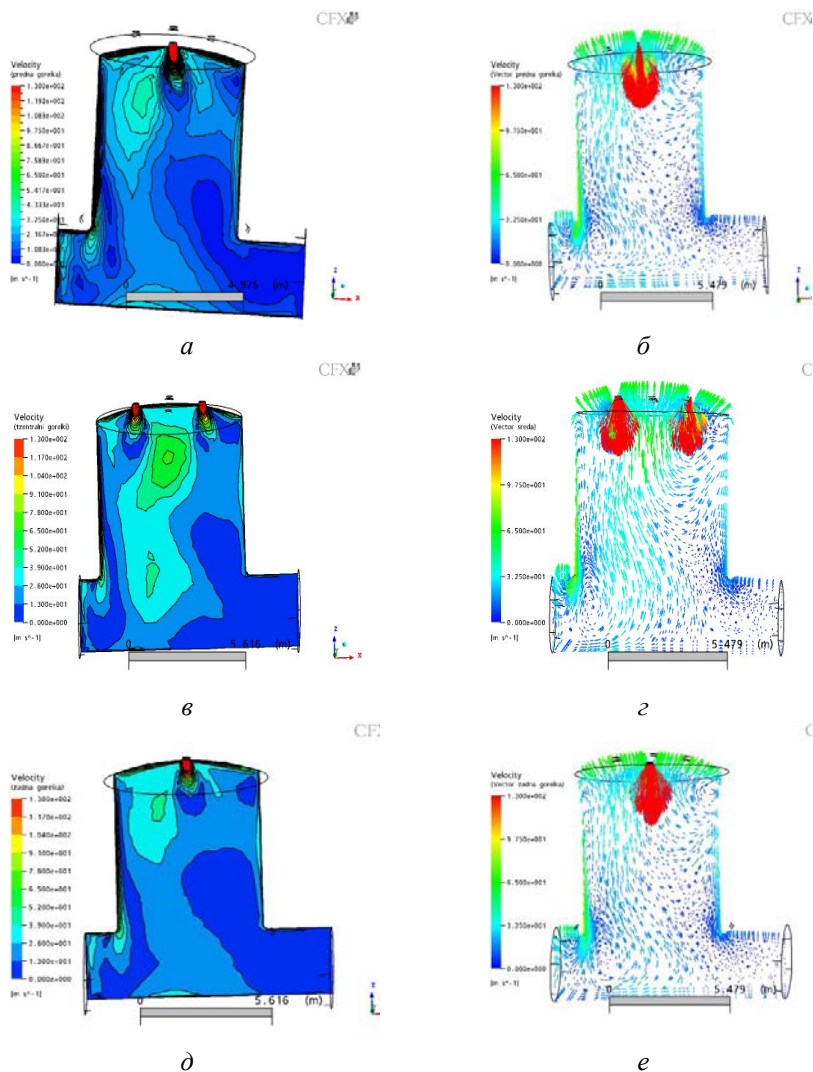
Фигура 49: Завихряне на потока на изход от горелките в подсвдовното пространство на реакционната шахта в аксиално направление
а,б- завихряне на потока при работа на една горелка; в- завихряне на потока при работа на две срещуположни горелки

Скоростта в тези зони е по-ниска от основната скорост, което дава основание да се твърди, че част от потока, който напуска изходното сечение на горелката, се връща обратно нагоре към свода – факт, доказан и от експеримента с лабораторния модел и потвърден от други автори. Около оста на симетрия на шахтата в непосредствена близост до свода се оформя рециркуляционна зона със сравнително голям размер. Разбира се, геометрията на свода на реакционната шахта оказва своето влияние върху движението и формоизменението на потока е в резултат на нейното въздействие. От друга страна стените на модела са приети за абсолютно гладки т.е. няма грапавини и потокът не губи част от кинетичната си енергия. Поради тези причини интензивността на рециркулацията в разглежданите области е голяма. От илюстрациите на **фигура 49** се вижда зараждането на вихрова зона в централната част на изследвания обем.

Резултати от симулирането на скоростното поле в аксиално направление

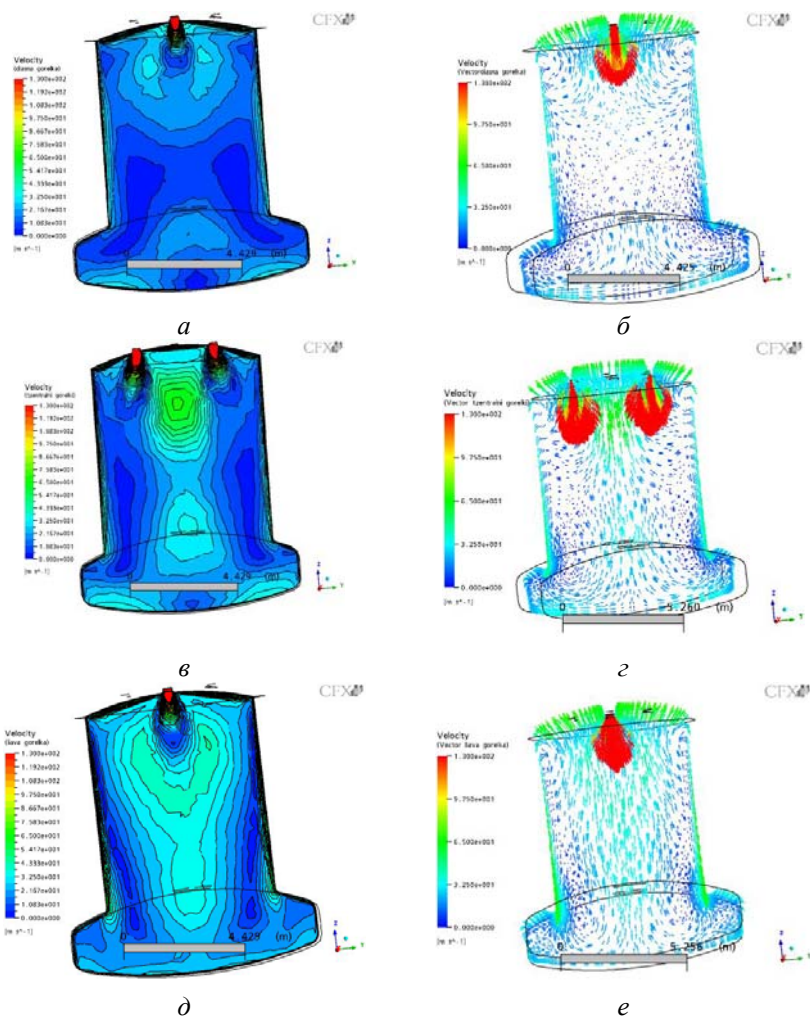
На **фигури 50** и **51** се представени илюстрации на скоростното поле в реакционната шахта на изследвания агрегат в аксиално направление, в равнините xz и yz , за струи формиращи от една и две шихтови горелки. Вижда се, че рециркулиращи обеми с голяма интензивност съществуват в областите между формираните струи и между струите и околните стени на модела, като в равнината yz се наблюдава много силна рециркулация между потока и стената на модела. Това е областта от реалната пещ, където въздействието на факела върху зидарията е най-силно изразено. Образуват се налепи и се налага смяна на огнеупора, с произтичащите от това последици, свързани с нарушаване на производствения цикъл.

Около околните ръбове в долната част на модела се наблюдава силно изразена рециркулация и градиент на скоростта. Тук отново има проблем с износването на зидарията.



Фигура 50: Илюстрация на скоростното поле в аксиално направление в равнината xz

а, б-скоростно поле формирано от горелка, разположена зад оста на симетрия на реакционната шахта; в, г-скоростно поле формирано от две срещуположни горелки; д, е-скоростно поле формирано от горелка, разположена пред оста на симетрия на реакционната шахта



Фигура 51: Иллюстрация на скоростното поле в аксиално направление в равнината yz
a, б-скоростно поле формирано от горелка, разположена зад оста на симетрия на реакционната шахт;
в, г-скоростно поле формирано от две срещуположни горелки;
д, е-скоростно поле формирано от горелка, разположена пред оста на симетрия на реакционната шахт

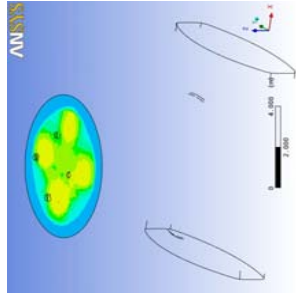
Резултати от симулирането на скоростното поле в радиално направление

Резултатите потвърдиха факта, че в *калибър 6, 10 и 12* траекторията на потока е насочена към най-отдалечената горелка от изходящия отвор на модела, което се дължи на влиянието на обособения централен вихър, наличието на който се доказва при лабораторния експеримент и от илюстрациите, представени на *фигури 50 и 51*. Освен това се потвърдиха формулираните хипотези, че след *калибър 10* започва взаимодействие между съседните горелки, а след *калибър 18* - между срещуположните горелки. В по-долните нива на обекта скоростта на факела се осреднява. Подобно на лабораторния експеримент, около струята, разположена на най-голямо разстояние от изходящия отвор, е обособена област с по-високи скорости.

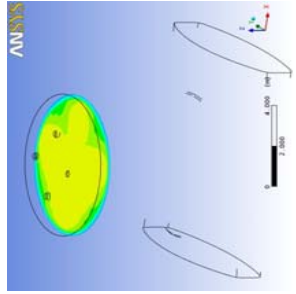
Резултати от разпределението на температурното поле и масовия дял на продуктите от горенето

На *фигура 59* са представени илюстрации на температурното поле в изследвания обем. Отделните температурни области до известна степен се покриват с реалната картина в агрегата. На *фигура 60* е илюстрирано разпределението на фаялита в реакционния обем. Тази фигура доказва, че образуването на фаялит започва в по-високите нива на модела, което е резултат от въздействието на рециркулиращите обеми в реакционната шахта. Достигната е необходимата температура за образуването му - 1208 °C. Потвърден е фактът, че частиците по периферията на потока реагират по-бързо поради наличието на по-големи температурни градиенти, което отново потвърждава съществуването на интензивна рециркулация на потока. Медният сулфид е равномерно разпределен в обема (*фигура 61*), а наличие на халкопирит се констатира единствено на изход от горелките. Следователно, единственият топлинен източник в горната част на реакционната шахта са рециркулиращите потоци, които пренасят топлинна енергия, необходима за разлагането на висшия сулфид и спомагат за възпламеняването на сулфидните частици. Както е показано на *фигура 59в*, зоната с максимална температура се заражда на разстояние около 3 m от свода на реакционната шахта.

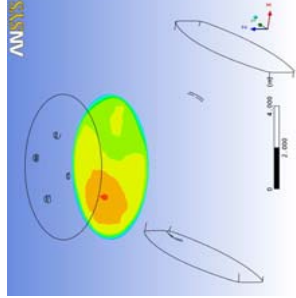
От симулацията се получиха потвърдителни резултати за газовата фаза. Оказа се, че в целия обем количеството на кислорода е приблизително равно на нула, което е 100 % изразходване още на изход от горелките и потвърждава изказаните хипотези от други автори и получените резултати в други наши изследвания.



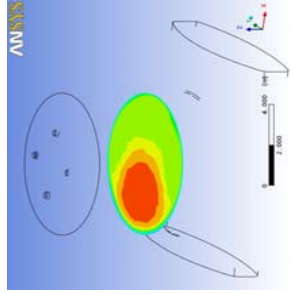
подсвдовото
пространство на модела



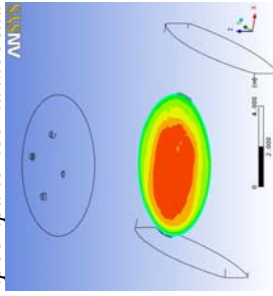
калибър 6



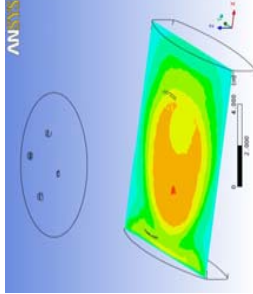
калибър 10



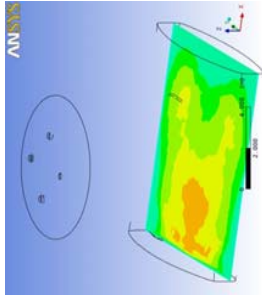
калибър 12



калибър 18



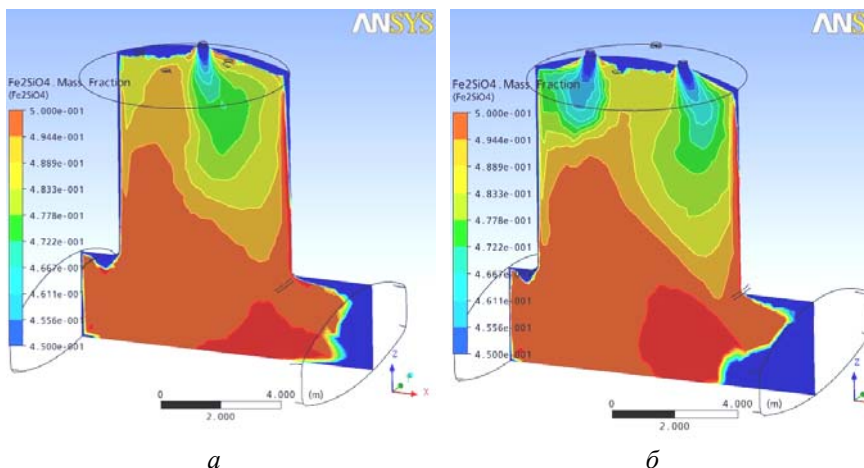
калибър 24



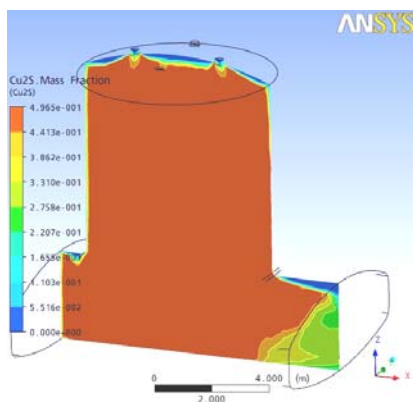
в оста на симетрия на
отстойната зона



Фигура 59: Контурно изображение на температурното поле в изследвания обем



Фигура 60: *Разпределение на фаялита в обема на модела
а-при работа на една горелка; б-при работа на две горелки*



Фигура 61: *Разпределение на медния сулфид в обема на модела*

ИЗВОДИ ОТ ГЛАВА VI

Представеното визуализиране на скоростното поле е проверка на формулираните хипотези при аеродинамичния анализ на реакционното пространство на факелната пещ Outokumpu и направените експерименти в лабораторни условия. То е доказателство за сложната аеродинамична ситуация в реакционната шахта на пещта.

1. Представените резултати от компютърната симулация, са сходни с тези, получени от експеримента върху физичния модел, по отношение на разположението на зоните с рециркулация и до известна степен по отношение на тяхното влияние върху структурата на факела. Като цяло, постигнатото сходство отговаря на закономерностите, характеризиращи движението на струи с висока турбулентност, описани в литературата. Наблюдават се следните явления, влияещи върху структурата на факела:

- ✓ силно изразено смесване в областите между съседните и срещулежащите струи, което основно се дължи на рециркулационната зона, разположена по оста на шахтата (този факт бе отчетен и при лабораторните експерименти);

- ✓ смесване между потока от основната струя и околната за нея среда при наличие на голямо вихрово движение в пространството между струите и стените, които ги ограждат.

2. По отношение на температурното поле в изследвания обем получените данни са приемливи от гл.т. на спецификата на процеса. Доказано е, че единственият топлинен източник в горната част на реактора са рециркулиращите потоци, които пренасят топлина чрез конвекция и радиация при смесването му с потока на вход в шахтата.

3. По отношение на разпределението на продуктите от горенето е потвърдено, че в резултат на рециркулацията в подсводовото пространство отсъства свободен кислород, а образуването на фаялит започва в по-горните нива на реакционната шахта.

4. В техническата литература влиянието на рециркулационните зони върху физикохимичните и топлофизичните процеси в реакционната зона е представено нееднозначно. При представената симулация са доказани важни за практиката факти, а именно:

- ✓ една от основните роли на рециркулиращите обеми е, че спомагат за по-бързото възпламеняване на сулфидните частици;

- ✓ контактът на постоянно циркулиращия поток с околните стени и свода на реакционната шахта увеличава износоустойчивостта на зидарията, спомага за образуването на налепи, а контактът със стопилката увеличава взаимното разтваряне на отделните компоненти в нея;

- ✓ доказано е, че т.нар. „студена зона” в подсводовото пространство на реакционната шахта практически не съществува.

5. Потвърдени са хипотезите, изказани при анализа на резултатите от лабораторния експеримент и е доказано, че:

✓ на разстояние около 3 m от изходящия отвор на шихтовите горелки основния поток преодолява съпротивлението на движещите се срещу него рециркулиращи маси и ядрото на струите се запазва;

✓ интензивните рециркулиращи потоци и високата турбулентност разрушават окончателно несмутените обеми на четирите струи, в резултат на което скоростта в изследвания обем постепенно се осреднява;

✓ в централната част на реактора се формира рециркулационна зона с голям обем, която оказва съществено влияние върху формоизменението на струите.

6. Чрез направеното изследване е възможно да се имитира горене на различен сулфиден материал, като резултатите са подходящи за прогнозиране на влиянието на едрината и природата на шихтата върху технологичния процес.

7. Създадената симулационна процедура в средата Ansys CFX - 10 би могла да намери приложение в практиката за предсказване на температурното, концентрационното и скоростното поле в обема на пещта за факелно топене Outokumpu.

ОБЩИ ИЗВОДИ ОТ ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Въз основа на литературно проучване, отнасящо се за теорията и практиката на процеса пирометалургично добиване на мед от сулфидни суровини, е установена световната тенденция по прилагането на различните методи на топене. Акцентирано е върху специфичните особености при движението на потока в реакционната шахта на факелната пещ Outokumpu.

2. Въз основа на теоретичен анализ е конструирана и построена лабораторна инсталация, представляваща физичен модел на реакционна шахта и шихтова горелка на пещта за факелно топене Outokumpu с размери, подходящи за изследване на формираната турбулентна струя.

3. Установени са възможностите и условията за формиране на рециркулиращи потоци в обема на лабораторната инсталация.

4. Направен е анализ на аеродинамичната ситуация във факелната пещ Outokumpu и са установени местоположението и ролята на рециркулиращите обеми в агрегата, при работа с една и с четири шихтови горелки.

5. Получените стойности за скоростното поле в обема на лабораторната инсталация доказват съществуването на периферни и централно разположени рециркулационни зони. Установени са

различия в интензивността на тези зони, при формиране на струи от горелки, ориентирани по различен начин спрямо изходящия отвор на инсталацията.

6. Установена е структурата на високотемпературния факел и е изяснен характерът на циркулиращите обеми и влиянието им върху нея. Установено е влиянието на рециркуляционните зони върху технологичния процес. Получените резултати са използвани за усъвършенстване и оптимизиране на системата за управление на факелното топене на сулфидни медни концентрати.

7. Представен е нов подход за обработване на експерименталните резултати и изобразяване на скоростния профил в лабораторната инсталация, който позволява с голяма точност да се представи скоростното поле в различни сечения.

8. Симулирано е движението на потока в лабораторната инсталация в различни работни среди на програмния продукт Ansys (Ansys Workbench CFX-12 и Ansys 5.5). Получено е добро сходство между резултатите за скоростното поле от лабораторния експеримент и компютърната симулация. Процедурата би могла да се адаптира за целите на обучението на студенти по дисциплината «Факелни технологични процеси».

9. За аналитичното изследване на аеродинамиката на факела е изграден математичен модел, работещ в средата Ansys CFX-10, който е адаптиран към работата на пещта за факелно топене Outokumpu.

10. Симулирано е движението на потока чрез имитиране на горивен процес на сулфидна шихта. Изследвано е скоростното поле на формираните високотемпературни хетерогенни струи. Траекторията на потока е в добро съответствие с направения аеродинамичен анализ. Получено е добро сходство между резултатите от компютърното симулиране и лабораторния експеримент по отношение на разположението на рециркулиращите обеми и приемливо сходство с теоретичните данни по отношение на температурното поле. Получени са потвърдени данни от теорията и практиката на факелното топене в агрегат Outokumpu.

11. Създаденият модел е възможно да се приложи за имитиране на горене на различен по природа и едрина сулфиден материал, при различни режимни параметри на потока. Той позволява на базата на различни производствени ситуации да бъде получавана информация за стойностите на пряко неизмерими величини – скоростни, температурни и др. полета. Може да бъде използван за целите на обучението на студенти и специалисти, работещи в производството на факелното топене на мед съдържащи суровини.

12. Доказани са важни за практиката явления:

- ✓ до 2 m от изходящия отвор на шихтовите горелки основният поток преодолява съпротивлението на движещите се срещу него рециркулиращи маси;

- ✓ в централната част на реакционната шахта се формира рециркуляционна зона с голям обем, която оказва съществено влияние върху структурата на технологичния факел;

- ✓ зона на нагряване на потока под свода на реактора практически не съществува;

- ✓ технологичният факел, формиран от една шихтова горелка, е по-стабилен в аеродинамично отношение и има по-малко агресивно влияние върху зидарията на реакционната шахта.

13. Разположението и обемът на рециркуляционните зони зависи главно от броя на шихтовите горелки, производителността на агрегата, началната скорост, плътността на потока, съдържанието на кислород и различни фактори, свързани с конструктивните особености на горелката и реакционната шахта на пещта. Ролята им за технологичния процес може да се обобщи както следва:

- ✓ повишават вероятността от среща и взаимодействие на получените в хода на топенето фази;

- ✓ осигуряват необходимата температура за възпламеняване на постъпващите шихтови частици;

- ✓ увеличават времето на престой на сулфидните частици в реакционната шахта, което води до преокисляването им;

- ✓ увеличават прахоуноса и загубите на топлина и ценен метал с праховете;

- ✓ в резултат на рециркуляцията на потока съществува непрекъснат контакт между факела и стените на агрегата. Тя е причина за образуването на налепи и износване на зидарията в пещта.

ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научни приноси

1. Изследвана е структурата на потока, формиран в реакционната шахта на факелната пещ Outokumpu, работеща с четири шихтови горелки чрез неизползван досега за тази цел подход – комбиниране на лабораторен експеримент върху физичен модел на реакционната шахта и компютърно симулиране на движението на потока. По този начин е възможно идентифицирането на разположението на рециркулиращите обеми в реакционната шахта на пещта.

2. Конструирана е и е построена лабораторна инсталация, представляваща физичен модел на реакционна шахта и шихтова горелка на пещта за факелно топене Outokumpu с размери, подходящи за изследване на формираната турбулентна струя.

3. Установена е аеродинамичната ситуация в реална пещ, работеща с една и с четири шихтови горелки, и местоположението на зоните с рециркулация. Определени са разстоянията, на които се осъществява контакт между струите в пещ, работеща с четири шихтови горелки.

4. Симулирано е движението на потока в лабораторната инсталация в различни работни среди на програмният продукт Ansys (Ansys Workbench CFX-12 и Ansys 5.5). Процедурата би могла да се адаптира за целите на обучението на студенти по дисциплината «Факелни технологични процеси».

5. Представен е нов подход при компютърното симулиране на движението на потока чрез имитиране на горивен процес на сулфидна шихта. Получени са потвърдени данни от теорията и практиката на факелното топене в агрегат Outokumpu.

Научно-приложни приноси

1. Представени са и са потвърдени хипотези за структурата на високотемпературния факел и за характера на рециркулационните зони в реакционната шахта на факелната пещ Outokumpu. Установено е влиянието на рециркулацията върху технологичния процес. Получените резултати са използвани за усъвършенстване и оптимизиране на системата за управление на факелното топене на сулфидни медни концентрати.

2. Създаден е модел в работната среда Ansys CFX-10, който е адаптиран към работата на пещта за факелно топене Outokumpu и може да се приложи за имитиране на горене на различен по природа и едрина сулфиден материал при различни режимни параметри на потока. Той позволява на базата на различни производствени ситуации да бъде получавана информация за стойностите на пряко неизмерими величини - скоростни, температурни и др. полета. Може да бъде използван за целите на обучението на студенти и специалисти, работещи в производството на меден щейн от сулфидни суровини.

Научни публикации, свързани с темата на дисертацията

1. (230*) Choshnova D., Stefanov B., Study of the Conditions of the Formation of Circulation Zones in a Laboratory Model of a Flash Smelting Furnace, Russian Journal of Non-Ferrous Metals, Vol. 51, № 5, 2010, p. 434-438.
2. (235*) Choshnova D., Stefanov B., Structure of the torch, formed during melting of copper charge in the furnace Outokumpu. Laboratory experiment, Journal of the UCTM, Vol.46, № 1, 2011, p. 89-94.
3. (234*) Choshnova D., Stefanov B., Structure of the torch, formed during melting of copper charge in the furnace Outokumpu. Computer simulation, Russian Journal of Non-Ferrous Metals, Vol. 52, № 1, 2011, p. 62-68.

Доклади на международни конференции, свързани с темата на дисертацията

1. (236*) Stefanov B., Choshnova D., Stefanova V., Determination of the Aerodynamic Parameters of the Rezirculation Zones in the Reaction Shaft Of the Flash Smelting Furnace for Sulphide Row Materials, IXth Proceedings International Metallurgy and Materials Congress, Instambul, 11-15 june 1997, Vol.II, p.1199-1203.
2. (233*) Чошнова Д., Стефанов Б., Борисов Д., Аеродинамичен анализ на реакционното пространство на пещ за факелно топене на сулфидни медни суровини, X^{та} национална конференция по металургия с международно участие, Варна, ISBN 978-954-92052-1-3, 28-31 май 2007.
3. (232*) Колев Д., Стефанов Б., Чошнова Д., Борисов Д., Метод за числено моделиране и графично изобразяване на скоростното поле във физичен модел на пещ за факелно топене, Първи международен семинар “Металургична топлотехника” София, ISBN 954-9748-70-7, 3-4 ноември 2003, с.175-182.

**номерът, под който публикацията е представена в дисертацията*

Благодарности

Благодаря на доц. д-р инж. Борис Стефанов и доц. д-р инж. Венко Петков за насоките при изготвянето на дисертацията.

Благодаря на доц. д-р инж. Веселин Илиев и доц. д-р инж. Нина Пенкова за оказаната помощ при изготвяне на Глава VI от дисертацията.

Благодаря на семейството си и на всички приятели и колеги, които ме подкрепят.

Д. Чошнова