



**ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И
МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ**

**ФАКУЛТЕТ ПО МЕТАЛУРГИЯ И
МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ**

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

инж. Илиян Стойков Митов

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРЕНОСНИ ПРОЦЕСИ
ВЪВ ВЪРТЯЩИ СЕ ПЕЩИ**

за придобиване на образователната и научна степен
“доктор”

по научна специалност

5.9. Металургия (Металургична топлотехника)

Научен ръководител: доц. д-р инж. Райко Станев

Научно жури:

1. доц. д-р инж. Борис Стефанов – председател и рецензент
2. проф. д-р инж. Цоло Рашев – рецензент
3. проф. д-р инж. Минчо Минчев
4. доц. д-р инж. Явор Лукарски
5. доц. д-р инж. Райко Станев

София, 2012

Дисертационният труд е написан на 168 страници и съдържа 76 фигури, и 4 таблици. Цитирани са 116 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на Разширения научен съвет на научното звено на катедра “Физична металургия и топлинни агрегати”, състояло се на 02.04.2012 год.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 09.07.2012 год. 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, етаж 4, сграда “А” на ХТМУ.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на темата

Въртящите се пещи са агрегати за високотемпературна термична обработка на различни материали в непрекъснат технологичен процес. В миналото те са били асоциирани само с производството на цимент, но тяхната сфера на приложение постепенно се разширява и развива. В настоящия момент тези съоръжения се използват в много промишлени клонове като химичния, металургичния, силикатния, фармацевтичния и др., а също и в комуналното стопанство за изгаряне на остатъчни материали от различни индустриални инсталации или на битови отпадъци. В тях могат да се осъществяват процеси сушене, инсинерация, смесване, нагряване, пържене, охлаждане, овлажняване, калцинация, редукция, синтероване, топене, газификация, дехидратация и реакции между газова и твърда фаза.

В металургията въртящите се пещи намират приложение за термична обработка на насипни материали, например редукция на оксидни руди, калцинация на варовик, сушене на сулфидна медна шихта, почистване на метални стружки от машинно масло и др.

При температури над 1250 K и частици с едрина под 30 mm въртящите се пещи се оказват най-доброто и често единственото решение за осъществяване на редица процеси. В зависимост от предназначението им, температурата на газовете в тях може да бъде по-висока от 1820 K, както е при обработката на клинкера в циментовото производство, а горната граница на този параметър достига 2270 K. Необходимата за целта топлина се набавя най-често чрез горивен процес на първичен енергоносител. Тази потребна енергия се пренася към слоя от обработван материал и към вътрешната повърхност на пещната стена чрез конвекция и чрез излъчване. Ето защо характеристиките на горелките и създаваните от тях струи и факли оказват много съществено влияние върху цялостната работа на съоръженията.

Разглежданите агрегати позволяват третиране на най-разнообразни материали, притежаващи топлофизични свойства, изменящи се в широки граници. Освен това, при подходящо управление на експлоатационните им параметри, натоварването на тези топлотехнически инсталации също позволява значителни отклонения от номиналния им режим. Често тяхната универсалност е основание за използването им за инсинерация на опасни отпадъци, която се извършва в сравнително дълбоки слоеве, но след въртящата се пещ се предвижда вторична горивна камера, която подобрява хетерогенното изгаряне на съответния материал. Друго приложение на тези съоръжения извън типичната за тях огнева обработка на различни среди е газификацията на отпадъчни каучукови продукти (например стари автомобилни гуми) или дървесни частици.

Анализът на посочените технологични операции показва, че въртящите се пещи могат да бъдат използвани за три основни цели:

- нагряване,
- осъществяване на химични реакции и
- сушене на твърди материали.

В много случаи тези процеси протичат комбинирано, което усложнява разглеждането им от позициите на отделни научни направления и налага комплексен подход към съответния агрегат.

При проектирането на въртящите се пещи трябва да се отчитат следните важни аспекти от инженерно-техническа гледна точка. Това са:

- топлопренасянето,
- движението на материала през цилиндричното работно пространство,
- масопренасянето между газовата и твърдата фаза, и
- химичните реакции.

Въпреки че всеки от тези преносни процеси има собствена специфика и представлява сам по себе си достатъчно интересен за изучаване проблем, а освен това оказва значимо влияние върху останалите, се е наложило мнението, че топлообменът има приоритет пред останалите явления. Аргументацията на изказаното твърдение е, че в много случаи

той определя производителността на въртящата се пещ и е пряко свързан с характеристиките на факела, доставящ необходимата топлина за осъществяваната технологична операция. Затова понастоящем този преносен процес в неговото многообразие е основен акцент в изследванията на въртящите се пещи. В същото време неговите особености продължават да бъдат недостатъчно изучени и само до известна степен разбрани, което е основание за продължаване на усилията в тази посока.

Върху експерименталните данни, събирани от различни въртящи се пещи, оказват влияние много параметри. Такива са диаметърът на агрегата, честотата на въртенето му, степента на запълването му с обработвания материал, както и собствените характеристики на последния като едрината на частиците му, тяхната форма и състоянието на повърхността им. Ориентирането в това многообразие от фактори, обуславящи процесите във въртящите се пещи, е трудна задача дори за опитни изследователи и специалисти по експлоатацията им. Затова един от намиращите се на разположение подходи е създаването и осигуряването на възможност за ползване на математични модели, които да позволяват предсказването на споменатите по-горе параметри индивидуално за всеки материал, без да се налагат физични експерименти или при свеждане до минимум на броя на емпирично установяваните величини.

В математичните модели не следва да се отчита само топлопренасянето като най-важно явление, тъй като всеки от останалите три феномена е в състояние да окаже интензифициращо или забавящо въздействие върху топлопренасянето и по този начин да се превърне в тясно място за функционирането на агрегата. Така например, движението на частиците на обработвания в дадена въртяща се пещ твърд материал може да е от решаващо значение за нейната експлоатация, тъй като ограничава способността му да усвоява топлинния поток, освобождаван от факела. Освен това, изтичането на дисперсната среда от съответния агрегат, което също е елемент от проблемите на движението на потоците в него, има сложно и решаващо влияние върху цялостната обстановка в цеха. От една страна, то определя разположението

на следващите апарати по технологичния поток. От друга страна, параметрите при изтичане от пещта дефинират началните условия за моделиране на аксиалната височина на слоя в нея и оттам – на площта на топлообменната му повърхност. В литературата тази височина на изхода опростено се приема за нулева, което не отговаря на физичната реалност. Ето защо смесването и транспортирането на третираните в агрегата гранулирани среди имат много съществено влияние върху всички останали процеси в тях, и са обект на непрекъснато задълбочаващи се изследвания.

Обосновка на необходимостта от изследването

Независимо от широкото разпространение на обсъжданите агрегати и дългогодишните традиции в тяхното инженерно приложение, те като цяло се оказват твърде недостатъчно изучени. За тяхното оразмеряване и управление продължават да се използват предимно емпирични методи. Основната причина за такъв подход е невъзможността за провеждане на необходимите измервания в тези пещи вследствие на тяхното непрекъснато въртене, високите им работни температури и в някои случаи – твърде големите им размери. Към възпрепятствания достъп до съответния обект се добавят и изброените сложни, взаимно обусловени и трудни за разграничаване механични, физико-химични, топло- и масообменни процеси, които се осъществяват в работното пространство на всеки агрегат, а също между него и околната среда.

Цел и задачи на изследването

От представения в дисертацията обзор на проблемите, които очакват своето задълбочено изследване или решаване в областта на въртящите се пещи, става ясно колко сложни и взаимосвързани са различните преносни процеси в тези агрегати. Поради това движението на материала, топлопренасянето, поведението на факела и горивните реакции имат съществено влияние върху условията за протичане на взаимодействията във въртящите се пещи. Правилното

оразмеряване на отделните елементи на системата и оптималното провеждане на процесите в тях осигуряват ефективно използване на горивото, продължителна безаварийна експлоатация, добри екологични показатели и високо качество на продукцията на изхода от инсталацията.

Целта, която се поставя пред дисертационния труд, може да се формулира синтезирано така:

да се установи влиянието на основните експлоатационни параметри на тръбни въртящи се пещи върху характера на движението на частиците и на топлопреносните процеси в агрегатите.

Реализирането на тази цел включва редица етапи, главните от които съвпадат с наименованията на съответните глави на работата. В по-разгърнат вид предстоящите за решаване задачи са следните:

- създаване и проверка на математичен модел, описващ отклоненията на падащите частици от цилиндричния корпус на пещта;
- подготовка и комплектоване на опитна инсталация за изследване на движението на материала, и топлообмена в директно нагривана тръбна въртяща се пещ, включително конструиране, надзор при изработката и монтиране на отделни нейни елементи;
- пускане в експлоатация на система за измерване на температурата в работното пространство и осъществяване на опити в празна пещ за установяване на температурното поле в цилиндричния ѝ корпус;
- създаване и проверка на математичен модел за определяне на дебелината на целия и на активния слой от обработван материал;
- генериране на алгоритъм за обработка на експериментални данни от изучаването на контактния топлообмен във външно нагривани въртящи се агрегати с цилиндрична форма;
- подготовка, комплектоване, пускане в експлоатация и настройка на опитна инсталация за изследване на

контактния топлообмен в индиректно нагривана тръбна въртяща се пещ;

- установяване на изменението на коефициента на топлоотдаване от вътрешната повърхност на експерименталния цилиндър към обработваните в него материали при различни скорости на въртене на корпуса му, степени на запълване на неговото работно пространство и диаметри на частиците;
- сравнение на придобитите данни от изследванията на контактния топлообмен във въртящи се пещи с резултати, получени по известни от литературата математични модели, с оглед формулирането на изводи за функционалната пригодност и точността на създадената опитна инсталация, а също и за адекватността на използваната изчислителна процедура;
- опитно определяне и анализиране на температурните профили в работното пространство на въртящия се цилиндър;
- изследване на зависимостта от изброените по-горе фактори на коефициента на топлоотдаване между стената на агрегата и разположения в него слой от частици при най-неблагоприятните от гледна точка на преносните процеси режими на преместване на материала, които могат да се появят при реални производствени условия, като хлътващото и плъзгащото движение;
- установяване доколко за описанието на контактния топлообмен при такива експлоатационни режими е допустимо използването на съществуващите математични модели, изведени за търкалящо движение;
- формулиране на конкретни и общи изводи, констатации, препоръки и перспективи за бъдещи изследвания на преносните процеси във въртящи се пещи.

Представяне на резултатите от дисертационния труд

Отделни части от изследванията, проведени в рамките на разглежданата работа, както и получените резултати от тях, са представени в следните публикации на автора, подредени в хронологичен ред:

- 1) Станев Р. Д., И. С. Митов. Експериментална въртяща се пещ за изчисляване на движението на твърдите частици и на топлообмена. Инженерни науки, 45, № 2, 2008, 56 – 67.
- 2) Митов И. С., Р. Д. Станев. Математично описание на отклоненията на падащите частици от дисперсен материал, обработен във въртяща се пещ. Инженерни науки, 45, № 3, 2008, 42 – 49.
- 3) Митов И. С., Р. Д. Станев. Приложение на аналитичен модел за определяне на дебелините на слоевете от материал във въртяща се пещ. Инженерни науки, 45, № 4, 2008, 58 – 67.
- 4) Митов И. С., Р. Д. Станев. Изследване на преносните процеси в пилотна въртяща се пещ. Доклад пред VII научна постерна сесия на ХТМУ – София, 19.05.2010, София, България.

II. КРАТКО ИЗЛОЖЕНИЕ НА СЪДЪРЖАНИЕТО НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. ЛИТЕРАТУРЕН ОБЗОР

Проблемите, към които е насочено вниманието при прегледа на достъпната литература, са групирани в две основни направления.

1.1. Свързани с движението на слоя във въртящи се пещи, отклоненията на падащите частици от тях и дебелината на пластове от дисперсен материал в тези агрегати

1) Разширяване на комбинациите от фактори, при които се провеждат изследвания на процесите на смесване и движение (напречно и аксиално) на частиците в слоя.

2) Изучаване на отражението на условията за изтичане на материала от изходящия отвор на агрегата с оглед да се съгласува работата му с тази на разположените след него апарати.

3) Математично описание на отклоненията на падащите частици от цилиндричния корпус на въртящата се пещ.

4) Експериментално и аналитично определяне на дебелината на целия и на активния слой от обработвания материал в агрегата.

5) Установяване на зависимостта на разпределението на частиците след падането им от пещта от фактори като скоростта на въртенето ѝ, степента на нейното запълване и вида на материала.

1.2. Свързани с контактния топлообмен в индиректно нагривани въртящи се пещи

1) Уточняване на влиянието на топлофизичните свойства на стената и на материала върху коефициента на контактен топлообмен във въртящата се пещ.

2) Определяне на времето за пребиваването на отделните фракции от частици в работното пространство на пещта заради пряката му връзка с ефективното усвояване на топлината от тях и влиянието на различните фактори върху този показател.

3) Задълбочаване на изследването на процесите на смесване и движение на частиците в слоя, и тяхното влияние върху контактния топлообмен между него и стената на въртящата се пещ.

4) Разпространяване на експерименталното изучаване на движението и контактния топлообмен на частиците във въртящата се пещ от предпочитаните от изследователите монодисперсни слоеве към такива с широк гранулометричен състав, каквито са повечето реално обработвани материали в промишлени условия.

5) Проверка доколко публикуваните математични модели за контактния топлообмен са в състояние да описват адекватно този процес при различни условия.

6) Разширяване на възможностите за изчисляване на основните параметри, характеризиращи този преносен процес

посредством зависимости, предназначени за търкалящо движение на слоя, по посока на други срещани в практиката режими.

7) Създаване на физично обосновани алгоритми за оразмеряване на въртящи се пещи, които да заместят прилаганите понастоящем предимно емпирични изчислителни методики.

8) Преодоляване на затрудненията, свързани с измервателната техника, при провеждането на директни експерименти в промишлени въртящи се пещи, произтичащи от големите им размери, въртящите се корпуси и високите температури.

От литературата са известни доста теоретични модели за описание на топлопреносните процеси в тръбни въртящи се пещи, отоплявани непосредствено от горелка, разположена в работното им пространство. Създаваните математични алгоритми са с подчертан интерес към моделиране на надлъжните температурни и концентрационни профили в тези агрегати. Те обикновено се състоят от серия от уравнения, представляващи енергийни, топлинни и материални баланси по аксиалните и радиалните напречни сечения на съответните обекти. В някои от тях се отчита и осъществяването на горивен процес.

Преглед на основните етапи и най-важните разработки, свързани с математичното описание на топлообмена в този тип инсталации, е направен в дисертационния труд. Там са посочени и някои от основните недостатъци на съществуващите модели.

Допирната точка между изучаването на агрегатите с вътрешно и външно отопление, по наше мнение, е топлообменът между слоя и закритата част от стената на цилиндъра. Трябва, обаче, да се прави разлика между обстановката в двата вида инсталации. Докато при директно нагриваните въртящи се пещи топлообменът от стената към материала е второстепенен механизъм, което се дължи от една страна на доминиращата роля на радиацията от факела, димните газове и откритите части на цилиндричната стена, а от друга – на липсата на външно нагриване на последната, то при агрегатите с индиректно подаване на топлина, преносът ѝ от вътрешната повърхност на

стената, наречен контактен топлообмен, е най-важният механизъм за повишаване на температурата на обработвания материал във въртящата се пещ.

Развитието на методите за математично описание на разглеждания процес е протекло при постоянното ограничаващо и респектиращо въздействие на факта, че изчисляването на контактният топлообмен в тръбните въртящи се пещи изисква познаването на множество параметри, които оказват влияние върху него, затова крайните формули са трудно приложими в практиката. Избягването на това неудобство не е възможно при наличието на толкова голямо количество сложни и взаимно обуславящи се процеси, които протичат едновременно в работното пространство на тръбните въртящи се пещи. Естественният път за преодоляване на затрудненията при емпиричното описание на тези обекти е разширяването и задълбочаването на диапазона на провежданите изследвания с цел да се придобие по-голяма сигурност и повтаряемост на получените опитни резултати, и да се повиши надеждността на базираните на тях математични зависимости. Следователно, натрупването на бази от данни, позволяващи проследяването на поведението на коефициента на топлоотдаване в зависимост от най-често променящите се параметри като скорост на въртене и степен на запълване на пещта, е уместно да се постави като основен приоритет при следващите експерименти.

Движението в тази посока е позволило да се установи, че получените въз основа на проучвания стойности на коефициента на контактен топлообмен за индиректно нагривани тръбни въртящи се пещи са в диапазона от 20 до 500 W/(m².К). Очевидно при тази разлика от 25 пъти е невъзможно да се работи с осреднени стойности, а е необходимо прецизиране на резултатите в зависимост от конкретните условия.

За да се намали броят на факторите, които участват директно в изразите за описание на контактният топлообмен, някои изследователи използват и теорията на физичното подобие. В резултат на това се появяват уравнения, свързващи по-малко на брой безразмерни комплекси, наречени критерии на подобие.

От направения литературен обзор на използваните в практиката съвременни въртящи се пещи, осъществен в глава 1 на дисертационния труд, на механизмите на движение на слоя в тях, представен в глава 2, и на топлообмена в тези агрегати, разгледан в глава 5 работата, прави впечатление по-слабата изученост на индиректно нагриваните агрегати. Същевременно те са твърде актуални в случаите, когато материалът трябва да бъде изолиран от прякото въздействие на факлите на горелките и на димните газове, изпълващи работното пространство на пещите с непосредствено нагриване.

2. СОБСТВЕНИ ТЕОРЕТИЧНИ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Глава 3. Математичен модел за изчисляване на отклоненията на падащите частици от въртящи се пещи

Тази част от дисертацията е посветена на създадения от нас математичен модел за изчисляване на отклоненията на падащите частици от въртящи се пещи. Неговото съставяне преминава през описание на пътя на частицата в работното пространство и определяне на нейната траектория, и отклонението ѝ при падането в зависимост от скоростта на въртене на цилиндъра и ъгъла, под който частицата го напуска. Проведените изчисления със създадения модел показват, че приетите постановки при неговото съставяне отговарят на природата на описаното физично явление. Констатирано е, че той може да се използва успешно за прогнозиране на натоварването на транспортната лента, отвеждаща обработения материал в пещта към консуматора.

По-долу са разгледани по-подробно само най-съществените етапи от тези изследвания.

3.1. Описание на пътя на частицата във въртяща се пещ

За да се пресметне траекторията и мястото на падане на частица от такъв агрегат е разработен математичен модел, с

чиято помощ е възможно да се предвиди отклонението на частицата от него.

Първата от конкретните цели на работата е да се предскаже разпределението на материала, падащ от пещта, което би дало отговор на въпросите как ще се разположи той върху транспортната лента и на какво разстояние ще се отдалечи частицата спрямо основната координатна система на агрегата в зависимост от вида на материала, диаметъра на цилиндричния му корпус, степента на неговото запълване и скоростта му на въртене.

В резултат на описания подробно в дисертацията математичен извод се стига до следната зависимост:

$$Y' = \tan \beta X' - \frac{g}{2} \left(\frac{X'}{nR \cos \beta} \right)^2, \quad (3.6)$$

където с R е означен вътрешният радиус на пещта, m , а g е земното ускорение, m/s^2 .

Уравнение (3.6) описва пътя, изминат от частицата в локалната координатна система $X'-Y'$ (фиг. 3.1. от работата).

3.2. Определяне на траекторията и отклонението на падащата частица в зависимост от скоростта на въртене на цилиндъра и ъгъла, под който частицата го напуска

Следващите стъпки са транслиране на локалната към основната координатна система на цилиндъра и определяне спрямо нея на траекторията на движение на падащата частица, а оттам и на нейното отклонение по отношение на основната координатна система на цилиндъра.

Осъществяването на преобразованията, представени в съответния раздел на дисертацията, води до получаване на окончателния израз:

$$X = R \sin \beta + \frac{\tan \beta + \sqrt{\tan^2 \beta + \frac{2g(h + R - R \cos \beta)}{n^2 R^2 \cos^2 \beta}}}{\frac{g}{n^2 R^2 \cos^2 \beta}}, \quad (3.13)$$

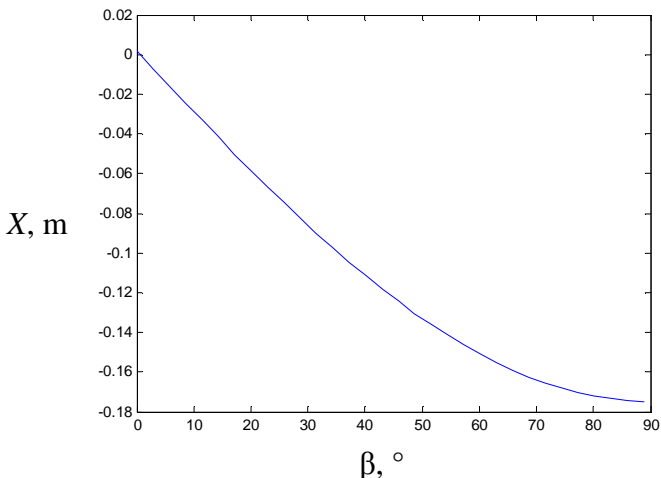
който дава възможност за изчисляване на хоризонталното отклонение на дадена частица като функция на основните параметри, които го определят.

3.3. Проверка на съответствието на създадения математичен модел с природата на описваните процеси

За да се прецени доколко изведеното на уравнение (3.13) е подходящо за използване, то е решено за скорости на въртене $1,67 \cdot 10^{-2}$, $8,33 \cdot 10^{-2}$ и $13,3 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, и за стойности на ъгъл β от 0 до 90° .

Изчисленията са проведени за пещ с диаметър 0,35 m, като са разгледани и двете посоки на въртене. Получените резултати са представени на *фиг. 3.3 ÷ 3.5* от дисертационната работа, като поради аналогичния им характер, тук е показана само първата от тях.

От показаните криви на *фиг. 3.3 ÷ 3.5* се вижда, че скоростта на въртене на барабана на пещта в изследвания интервал на изменение на този фактор оказва сравнително слабо влияние върху отклонението на частицата спрямо основната координатна система на цилиндъра. С нарастването на наблюдавания параметър се констатира известно повишаване на стойностите на X , т. е. дисперсният материал пада по-далеч от вертикалната ос на напречното сечение на барабана.



Фиг. 3.3. Отклонения на частиците, намиращи се в интервала на начален ъгъл от 0 до 90° при пещ с диаметър 0,35 m, скорост на въртене $1,67 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ и посока на въртене, съвпадаща с тази на часовникова стрелка

3.5. Анализ на приложимостта на модела за изчисляване на отклоненията на падащите частици от въртяща се пещ

Предложената процедура за пресмятане, както и резултатите от нейното използване, които са описани и представени в настоящата глава от дисертационния труд, дават основание да бъдат направени следните обобщения и констатации:

- 1) Съставен е математичен модел, позволяващ предсказване на отклоненията на падащите частици от пещта спрямо основната ѝ координатна система.
- 2) Проведените изчисления със създадения модел показват, че приетите постановки при неговото съставяне отговарят на природата на описаното физическо явление.
- 3) Математичният модел може да се използва за прогнозиране на натоварването на транспортната лента,

отвеждаща обработения в пещта материал към неговия потребител.

Глава 4. Определяне на дебелината на слоевете от дисперсен материал във въртящи се пещи

В раздел 2.2 е описан механизмът на търкалящото движение. От него става ясно, че целият обем, зает с частици, се характеризира с два слоя: тънък активен и дебел пасивен.

При въртящите се пещи с директно изгаряне на гориво над пласта от материал, активният слой играе важна роля при топлопренасянето. Затова се полагат усилия да се определят дебелината му, скоростта на частиците в него и времето на престоя им върху повърхността на пласта.

4.1. Аналитично установяване на разпределението на изходящия поток от цилиндъра

Вследствие на аксиалното движение на частиците, част от материала пада извън пещта. Представлява интерес създаването на възможност за определяне на неговото разпределение върху хоризонтална равнина под агрегата.

4.1.1. Концепция на тоталния модел

За да се предскаже разпределението на материала след падането му от пещта, е създаден и е представен в дисертацията модел, с който да се определя дебелината на слоя във всяка негова точка. При извода му се приема, че височината на слоя от материал в пещта е равна на височината на този от паднали частици от цилиндъра, а също и че напречните сечения на двата слоя имат една и съща, огледално обърната конфигурация.

Този модел е наречен тотален, защото обхваща общата височина на слоя от материал и се базира на предпоставката, че потокът от падащи частици е от цялото напречно сечение на обработвания материал. Геометричните и механичните закономерности, на които е базиран той, са описани изчерпателно по-долу. В раздели 4.1.2 ÷ 4.1.4 от дисертационната работа е демонстрирано неговото

функциониране, а в по-нататъшното изложение (част 4.3) вниманието е фокусирано върху приложението на създадения математичен алгоритъм за конкретни изчисления и анализи, както и върху експерименталното му потвърждаване.

Осъществяването на предложената в раздел 4.1.1. на дисертацията изчислителна процедура дава възможност да се определи дебелината на слоя навсякъде по напречното му сечение.

По такъв начин са получени точките в диаграмите, показани на *фиг. 4.2 ÷ 4.10* от работата, които онагледяват връзката между разпределенията на материала, на дебелината на активния слой и на вертикалната му дълбочина при задаване на различни нива на следните фактори:

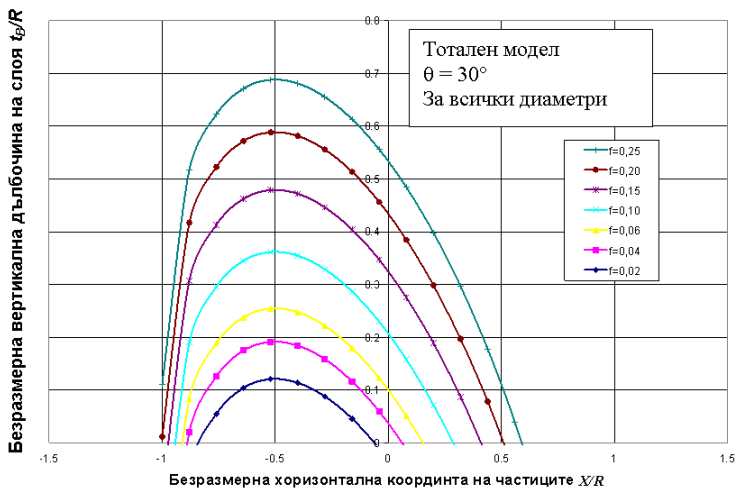
- диаметър на цилиндричната пещ,
- степен на запълването ѝ с материал,
- динамичен ъгъл на естествен откос,
- скорост на въртене на пещта и
- диаметър на частиците.

4.1.2. Разпределение на материала, формиращ слоя

На *фиг. 4.2 ÷ 4.4* от работата е показано разпределението на материала, т. е. на вертикално измерената дълбочина на слоя от него, при различни диаметри на цилиндричната пещ, степени на запълването ѝ с материал и динамични ъгли на естествен откос. Изчисленията са проведени за кварцов пясък с едрина 0,2 mm.

В настоящия автореферат е показана *фиг. 4.3*, която онагледява графичната връзка между разпределението на материала и степента на запълване на пещта при постоянен динамичен ъгъл на естествен откос, независимо от диаметъра на цилиндъра. От диаграмата се вижда ясно, че с нарастване на степента на запълване се повишава и вертикалната дълбочина на слоя.

Следващата цел е определяне на профила на активния слой с помощта на тоталния модел.



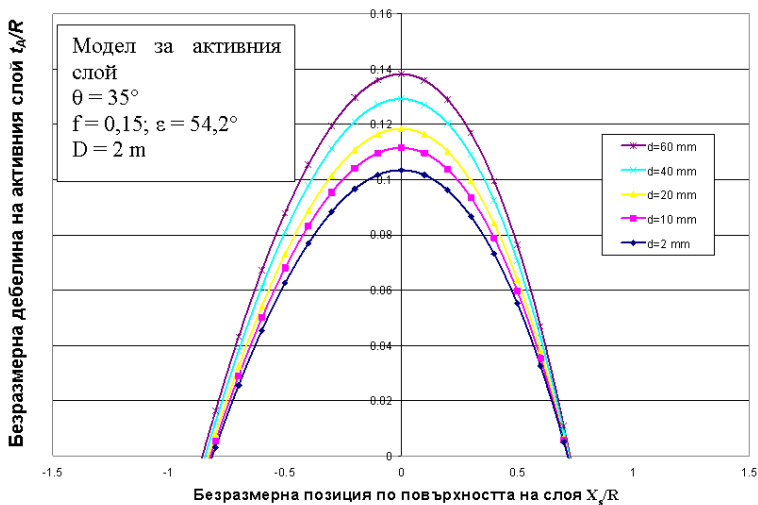
Фиг. 4.3. Разпределение на материала при различни степени на запълване на пещта

4.1.3. Разпределение на дебелината на активния слой

За определянето на дебелината на активния слой са проведени изчисления, базиращи се на чужд математичен модел, разработен от X. Y. Liu, E. Specht, O. G. Gonzales и P. Walzel.

Направени са изчисления за различни диаметри и скорости на въртене на пещта, и за различен размер на частиците на обработвания материал.

Получените резултати са показани графично на *фиг. 4.5 ÷ 4.7* от работата, а тук е предложена *фиг. 4.7*, от която се вижда, че при избраните постоянни нива на степента на запълване, динамичния ъгъл на естествен откос, диаметъра на пещта и скоростта ѝ на въртене, дебелината на активния слой зависи съществено от диаметъра на частиците на обработвания материал. Прави впечатление, че с нарастването на този фактор се увеличава дебелината на активния слой.



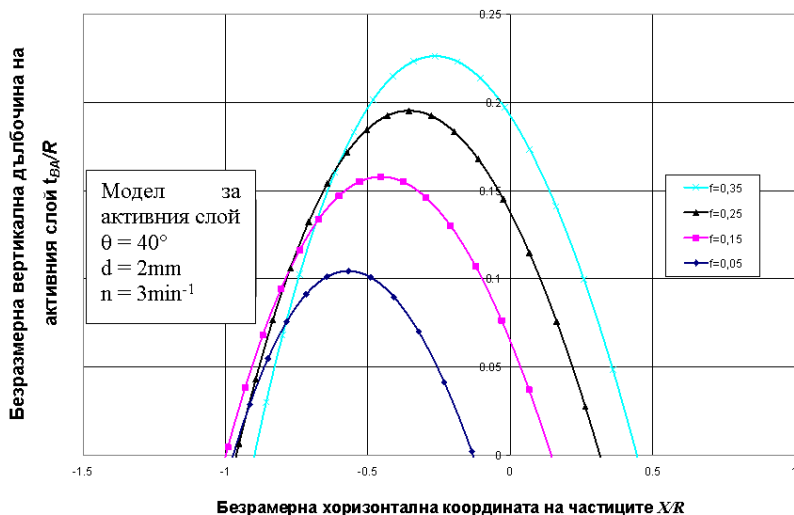
Фиг. 4.7. Разпределение на дебелината на активния слой при различни диаметри на частиците

След като вече се познава дебелината на активния слой, става възможно прилагането на тоталния модел по отношение на него, при което се получават данни за разпределението на вертикалната дълбочина на активния слой върху оста X на основната координатна система.

4.1.4. Разпределение на вертикалната дълбочина на активния слой

Фиг. 4.8 ÷ 4.10 онагледяват получените резултати за разпределението на вертикалната дълбочина на активния слой при различни диаметри на цилиндричната пещ, динамични ъгли на естествен откос и степени на запълването ѝ с материал. Последната от тях е предложена тук. Тя представя зависимостта между вертикалната дълбочина на активния слой и степента на запълване на цилиндъра с материал, когато динамичният ъгъл на естествен откос, диаметърът на частиците, скоростта на въртене на пещта и нейният диаметър не се променят. С нарастване на степента на запълване се наблюдава съществено

увеличаване на вертикалната дълбочина на активния слой, като максимумът на кривата на разпределението ѝ се премества по посока на въртенето на пещта. Забелязва се и повишаване на разпръскването на материала по оста X . Прави впечатление, че при минималната приета степен на запълване 0,05, активният слой се разпределя изцяло от лявата страна на основната координатна система на пещта.



Фиг. 4.10. Разпределение на вертикалната дълбочина на активния слой при различни степени на запълване на пещта

4.4. Изводи относно приложимостта на модела за определяне на дебелината на слоевете от дисперсен материал във въртяща се пещ

Проведените изследвания в рамките на поставените цели на дисертационната работа, засягащи настоящия раздел, могат да бъдат обобщени както следва:

1) Създаден е математичен модел, позволяващ определяне на общата дебелина на слоя от материал в цилиндрична въртяща се пещ и на активната част от него, наречен тотален модел.

2) Експериментално е установено разпределението на частиците при различни скорости на въртене на агрегата, различна степен на запълването му и за различни материали.

3) Опитно констатираното разпределение на изследваните материали демонстрира добро съгласуване с теоретично предсказаното по създадения тотален модел, което доказва съответствието му с физичната природа на описваните процеси.

По-нататък в същата глава е представена подробно подготвената, комплектована и пусната в експлоатация опитна инсталация за изследване на движението на материала, и топлообмена в директно нагривана тръбна въртяща се пещ, конструирането на която, надзорът при изработката и интегрирането към нея на отделни елементи са личен принос на автора. Тя е изградена в университета “Ото фон Герике” в гр. Магдебург, Германия. Състои се от метален цилиндър, който е облицован от вътрешната страна с огнеупорни тухли и се задвижва чрез електродвигател. В неговия корпус са предвидени отвори за монтиране на измервателни сонди (в случая това са термодвойки). Главната част на цилиндъра е с вътрешен диаметър 0,4 m и дължина 4,635 m. В двата края вътрешният диаметър намалява до 0,35 m. Тази особеност на конструкцията гарантира, че постъпващите частици в агрегата няма да тръгват в обратна на предвидената посока на движение, а също така служи като изпускаща стена за изходящия материал от пещта. Цилиндърът може да се накланя от -5° до $+5^{\circ}$ спрямо хоризонталната равнина на фундамента, а скоростта на въртенето му позволява изменение от 0 до 10 min^{-1} .

В резултат на проведените опити без материал в този агрегат е установено равномерно разпределение на наблюдаваните температури в достатъчен брой негови напречни сечения. Това е доказателство както за правилното разполагане на горелката, така и за доброто функциониране на системата за

измерване на температурите в отделните точки и позиции по дължината на цилиндричния му корпус.

Глава 5. Теплообмен във въртящи се пещи

След систематизиране на механизмите за пренасяне на топлина в двата основни вида въртящи се пещи от гледна точка на начина на нагриването им, както и обстояния преглед на съществуващите аналитични методи за описание на теплообмена в тези инсталации, които формират основната част от литературния обзор в разглежданата дисертационна работа и поради това са отразени в раздела от настоящия автореферат с това наименование, в глава 5 е представен генерираният от нас алгоритъм за обработка на експериментални данни от изучаването на контактния теплообмен във външно отоплявани въртящи се пещи с цилиндрична форма. При неговото създаване са въведени следните предпоставки:

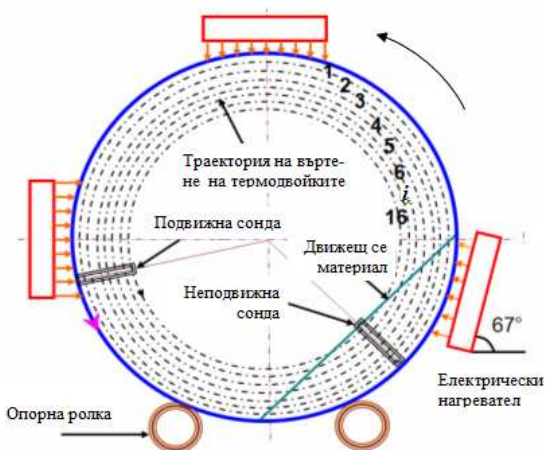
- 1) Преносът на топлина от стената към материала е без загуби.
- 2) Температурата на стената е постоянна и се пренебрегват аксиалните и радиалните температурни градиенти в нея.
- 3) Материалът се размесва достатъчно интензивно, което позволява използването на средна стойност на неговата температура.

Разработеният алгоритъм е проверен посредством сравняване на резултатите, до които води, с тези, които са получени по три известни от литературата математични модела, а именно на Wes и др., на Schlünder и на Li и др.

Отделено е достатъчно внимание на опитния стенд за изследване на контактния теплообмен в индиректно нагривана тръбна въртяща се пещ, който е подготвен, комплектован, пуснат в експлоатация и настроен с участието на автора на настоящата работа. Тази инсталация също се намира в споменатата вече лаборатория.

5.6.1. Устройство на опитния стенд

Експерименталният стенд, общата схема на който е показана на *фиг. 5.7*, се състои от цилиндър с вътрешен диаметър 0,6 m, дължина 0,45 m и дебелината на стената 2 mm. Той се нагрява външно от три електрически нагревателя с мощности съответно 2,2 kW, 1 kW и 1 kW. Изложената към тях повърхност на агрегата е черна, за да поема колкото е възможно повече топлина, а нагревателите са разположени максимално близо до него с цел да се минимизират топлинните загуби към околната среда. Стената на цилиндъра е направена от неръждаема стомана със съдържание на хром 10 %. Нейният коефициент на топлопроводност е $14 \div 16 \text{ W/(m.K)}$. В двата края на пещта са оформени дъна от кръгли метални плочи с отвори в центъра. Те служат за инсталиране на подвижната стоманена сонда, на която са фиксирани термодвойките, а също и за зареждане на материала в, и изпразването му от вътрешността на въртящия се цилиндър.



Фиг. 5.7. Схема на опитния стенд

Инсталацията и отделните ѝ елементи са подложени на щателни проверки и настройки, част от които са описани в дисертационната работа. Резултатите от тях са анализирани и са преценени като напълно приемливи от физична гледна точка. Освен това те потвърждават тенденциите, очертали се при проведена от други автори компютърна симулация, което е още едно доказателство за функционалната годност и прецизност на създадената от нас апаратура.

Въз основа направените тестове и получените температурни профили е установено, че сондата с термодвойки, с която е снабден експерименталният стенд, дава възможност за провеждането на прецизни измервания, които да служат като база за изучаване както на топлообмена от вътрешната повърхност на дадена външно нагривана тръбна въртяща се пещ към слоя от обработвани в нея частици, така и на останалите преносни процеси, протичащи в такива агрегати, например на режима на преместването на материала върху стените им.

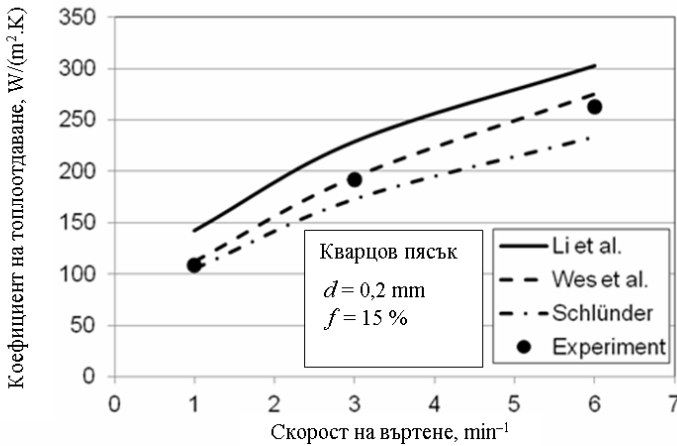
Глава 6. Контактен топлообмен във въртящи се пещи при търкалящо движение на слоя

Както става ясно от раздел 2.1, съществуват различни видове движения на слоя в дадена въртящата се пещ. В тази глава е разгледано само най-често срещаното търкалящо движение, а в следващата са представени резултатите и за други възможни режими.

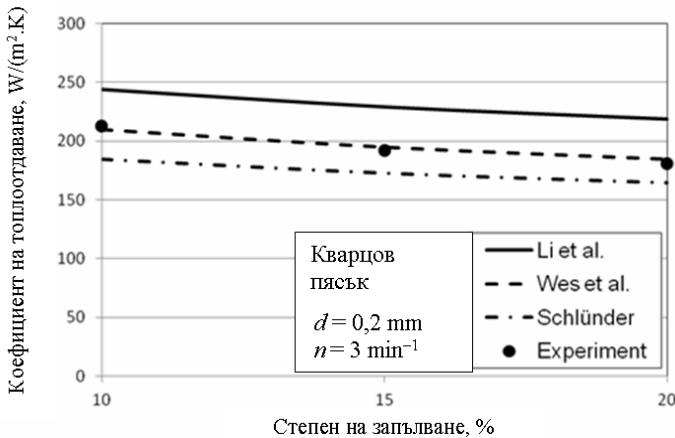
6.1. Опити с кварцов пясък

На *фиг. 6.1 ÷ 6.6* от дисертацията са показани стойностите на коефициента на топлоотдаване (НТС), характеризиращ интензивността на контактния топлообмен между вътрешната повърхност на пещта и обработвания в нея кварцов пясък с диаметър на частиците 0,2 mm. Те са получени въз основа на първата група от опити съгласно формулираните цели в описаната експериментална инсталация. Тук са представени *фиг. 6.2*, получена при средната от изследваните степени на запълване на работното пространство на пещта с

материал, и *фиг. 6.5*, която се отнася за междинната стойност на скоростта на нейното въртене.



Фиг. 6.2. Влияние на скоростта на въртене на пещта върху коефициента на топлоотдаване от стената към обработвания кварцов пясък при степен на запълване 15 %

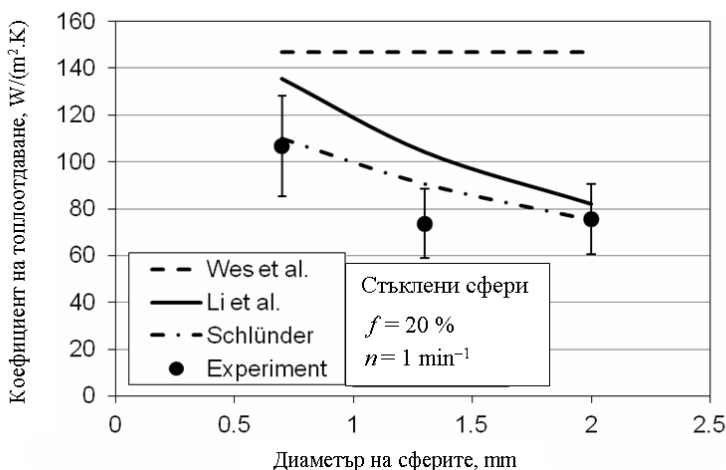


Фиг. 6.5. Влияние на степента на запълване на пещта върху коефициента на топлоотдаване от стената към обработвания кварцов пясък при скорост на въртене 3 min^{-1}

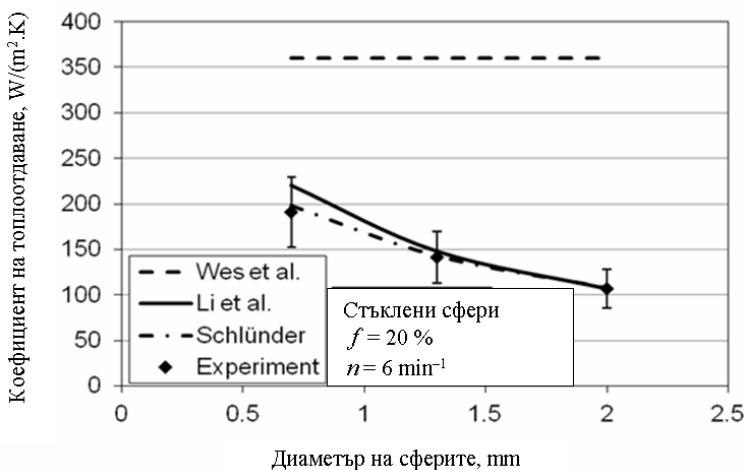
6.2. Опити със стъклени сфери

В съответствие с формулираните по-детайлни цели, втората група от опити е осъществена със стъклени сферични частици (мъниста) с диаметри от 0,7 до 2 mm.

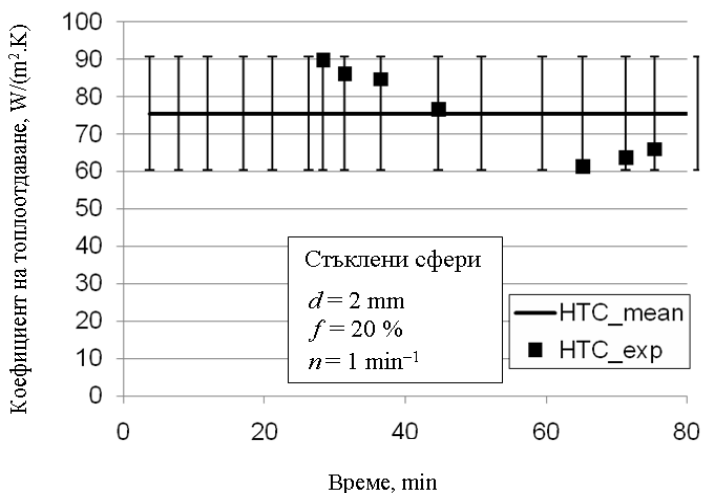
На *фиг. 6.7÷6.11* от дисертацията са представени стойностите на коефициента на топлоотдаване, характеризиращ интензивността на контактния топлообмен между вътрешната повърхност на пещта и обработваните в нея стъклени сфери с диаметри от 0,7 до 2 mm, които са получени въз основа на експериментите в описаната по-горе опитна инсталация, а също и по изброените три чужди математични модела.



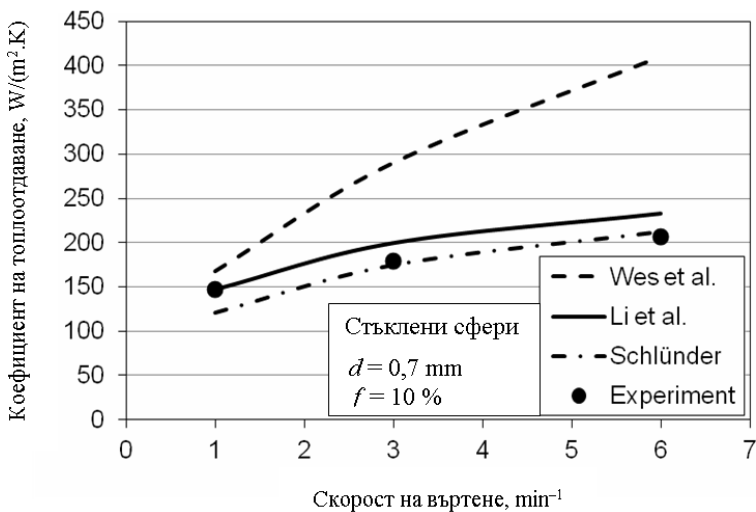
Фиг. 6.7. Влияние на диаметъра на частиците върху коефициента на топлоотдаване от стената към обработваните стъклени сфери при степен на запълване 20 % и скорост на въртене 1 min^{-1}



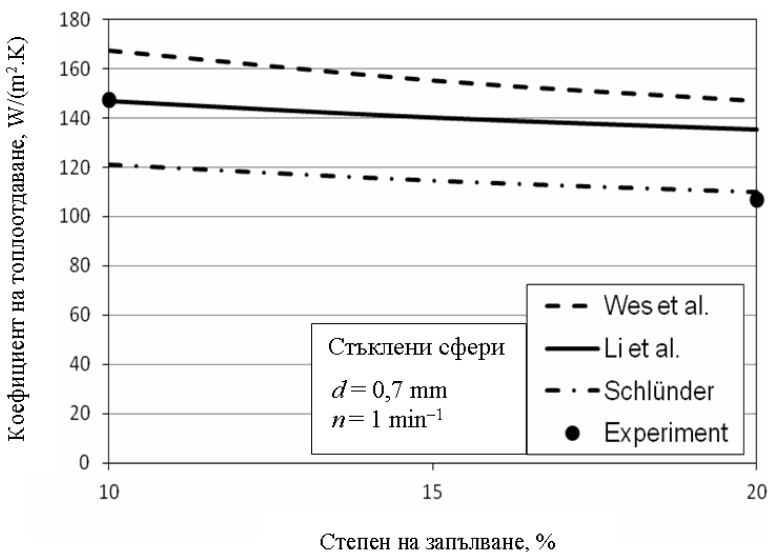
Фиг. 6.8. Влияние на диаметра на частиците върху коефициента на топлоотдаване от стената към обработваните съкълени сфери при степен на запълване 20 % и скорост на въртене 6 min^{-1}



Фиг. 6.9. Изменение на коефициента на топлоотдаване от стената към обработваните съкълени сфери във времето



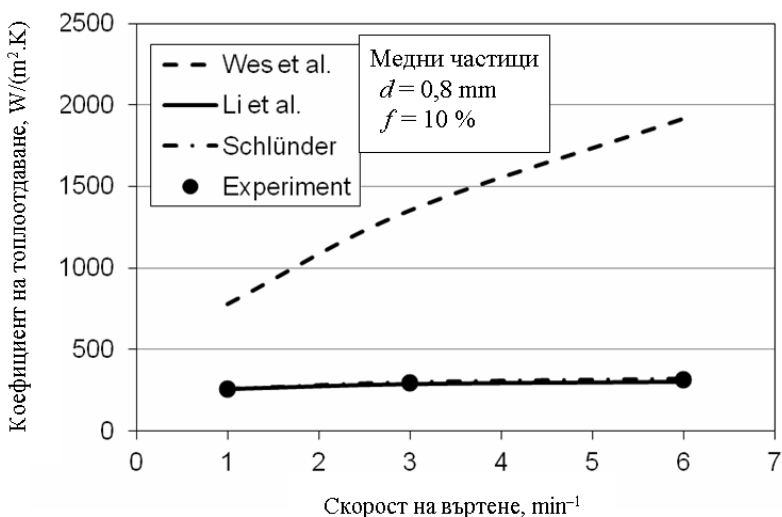
Фиг. 6.10. Влияние на скоростта на въртене на пещта върху коефициента на топлоотдаване от стената към обработваните стъклени сфери при степен на запълване 10 %



Фиг. 6.11. Влияние на степента на запълване на пещта върху коефициента на топлоотдаване от стената към обработваните стъклени сфери при скорост на въртене 1 min^{-1}

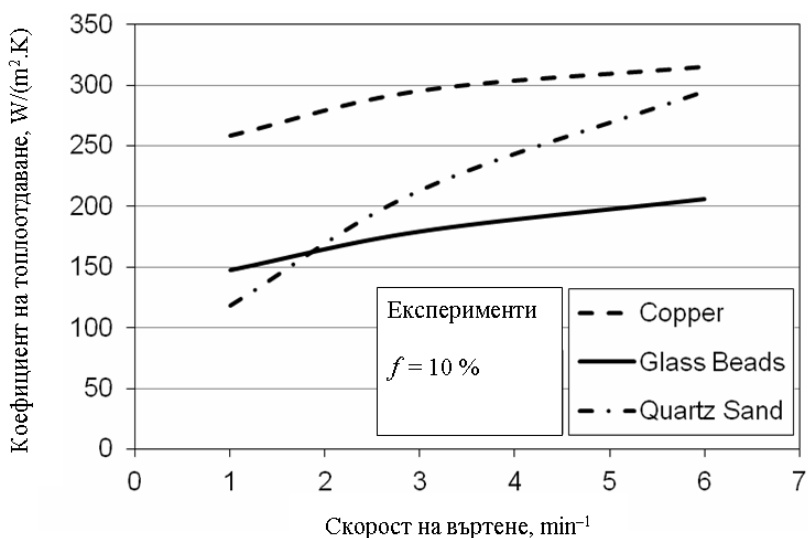
6.3. Опити с медни частици и съпоставка на резултатите от тях с тези от останалите изследвани материали

Фиг. 6.12 показва зависимостта на коефициента на контактен топлообмен между вътрешната повърхност на пещта и нагряваните в нея сферични медни частици с диаметър 0,8 mm от скоростта на нейното въртене при степен на запълване на работното ѝ пространство $f = 10\%$. Движението на изследвания материал в пещта и при този опит е търкалящо.



Фиг. 6.12. Влияние на скоростта на въртене на пещта върху коефициента на топлоотдаване от стената към слоя от медни частици при степен на запълване 10 %

Фиг. 6.13 демонстрира изменението на коефициента на контактен топлообмен между вътрешната повърхност на пещта и нагряваните в нея медни частици със споменатия по-горе размер, стъклени сфери с диаметър 0,7 mm и кварцов пясък с диаметър 0,2 mm, от скоростта на нейното въртене при степен на запълване на работното ѝ пространство 10 %.



Фиг. 6.13. Влияние на скоростта на въртене на пещта върху коефициента на топлоотдаване от стената към различни обработвани материали при степен на запълване 10 %

6.4. Дискусия на получените резултати при търкалящо движение на слоя

Представените резултати от изследването на контактния топлообмен между вътрешната повърхност на пещта и обработваните в нея частици от кварцов пясък, стъклени и медни сфери, за които е характерно търкалящо движение на слоя, позволяват да се забележи, че коефициентът на топлоотдаване зависи силно от скоростта на въртене на пещта, като с нейното увеличаване този показател също нараства значително. Освен това може да се констатира и неговата връзка със степента на запълване на цилиндъра с материал. От фигурите се вижда, че влиянието ѝ не е от съществено значение. Все пак може да се забележи, че при по-ниски стойности на този параметър, интензифицирането на контактния топлообмен между вътрешната повърхност на пещта и обработвания в нея

материал при повишаването на скоростта на въртенето ѝ е по-силно.

Фиг. 6.7 онагледява експериментално установеното намаляване на коефициента на топлоотдаване с увеличаването на диаметъра на стъклените сфери, което отслабва с повишаването на този параметър. При същите фиксирани скорост на въртене на пещта и степен на запълването ѝ, изчислените стойности по представените по-горе модели на Schlünder и на Li и др. показват аналогично поведение, като се констатира добро съгласуване между опитните и аналитично определените резултати. Изключение прави моделът на Wes и др., който не отчита като фактори диаметъра на частиците и порьозността на слоя от тях.

На *фиг. 6.7 ÷ 6.9* с вертикални отсечки са представени доверителните интервали на експериментално установените стойности. Сравнението между първите две диаграми показва, че с увеличаването на скоростта на въртене на агрегата от една страна се потвърждава констатираното вече значително повишаване на коефициента на топлоотдаване, а от друга – че моделите на Schlünder и на Li и др. започват да описват още по-добре получените от нас опитни резултати. В третата от изброените графики е демонстрирано изменението на коефициента на контактен топлообмен между вътрешната повърхност на въртяща се пещ и обработвания в нея материал във функция на времето за провеждане на опита. От *фиг. 6.9* се вижда, че относителната грешка при получаването на експерименталните резултати е около 20 % и е в рамките на приемливата при подобен вид измервания. Наблюдава се и една интересна тенденция, а именно, че до двадесетата минута на експеримента получените стойности са над линията на средния коефициент на топлоотдаване, а след това стойностите преминават под нея.

Представените на *фиг. 6.10* и *6.11* резултати за определяне на влиянието върху коефициента на контактен топлообмен между вътрешната повърхност на пещта и обработваните в нея стъклени мъниста на диаметъра на сферите, скоростта на нейното въртене и степента на запълване на работното пространство на цилиндъра с материал имат

аналогичен характер с този, проявен при изследване на кварцов пясък.

Фиг. 6.10 отново демонстрира тенденцията към повишаване на стойностите на коефициента на топлоотдаване с нарастване на скоростта на въртене и намаляване на степента на запълване на пещта. Това се дължи на увеличените обеми на заетите с въздух празни пространства между по-едрите частици, вследствие на които стената се намира по-често в контакт с газовата фаза, имаща около 65 пъти по-нисък коефициент на топлопроводност от стъклото.

От *фиг. 6.10* се вижда също, че моделът на Wes и др. показва по-голямо отклонение от опитните точки, отколкото останалите два. Това се дължи на посочените вече негови непълноти.

На *фиг. 6.11* е онагледено влиянието на степента на запълване на цилиндъра върху коефициента на топлоотдаване. От нея се вижда, че както и при споменатите вече резултати за кварцов пясък, въздействието на този фактор е по-слабо в сравнение с това на скоростта на въртене.

Направената на *фиг. 6.12* съпоставка между експериментално установените и изчислените стойности на коефициента на контактен топлообмен от вътрешната повърхност на пещта към нагряваните в нея медни частици при изменение на скоростта на въртенето й потвърждава и за този материал констатирания факт, че при търкалящо движение моделите, които отчитат диаметъра на частиците, могат да опишат много добре преноса на топлина към слоя.

От *фиг. 6.13* се забелязва качествено еднакво поведение на коефициента на топлоотдаване при изменение на скоростта на въртене на пещта за трите сравнявани материала. В количествено отношение може да се направи разлика между приблизително аналогичния характер на кривите за стъклени сфери и медни частици, като последните имат значително по-високи стойности, дължащи се на многократно по-добрата им топлопроводност. При кварцовия пясък изменението на коефициента на контактен топлообмен от вътрешната повърхност на пещта към него в наблюдавания диапазон от скорости на въртенето й е по-силно, което може да се отдаде на

по-добре изразеното търкалящо движение на слоя от този материал, а също на по-малките размери на неговите частици.

6.5. Обобщение на изследването на контактния топлообмен в индиректно нагривани въртящи се пещи при търкалящо движение на слоя в тях

Представената дотук част от експерименталното изучаване на контактния топлообмен между вътрешната повърхност на пещта и обработвания в нея материал може да се обобщи както следва:

- 1) Установено е, че с увеличаването на скоростта на въртене на агрегата се повишава коефициентът на топлоотдаване от стената му към нагривания в него кварцов пясък.
- 2) Констатирано е, че колкото по-ниска е степента на запълване на пещта с материал, толкова по-силно изразена е тенденцията към нарастване на коефициента на контактен топлообмен с увеличаването на скоростта на въртене на цилиндъра.
- 3) Установено е, че получените експериментални стойности на коефициента на топлоотдаване от вътрешната повърхност на пещта към обработвания в нея кварцов пясък се съгласуват много добре с данните от изчисленията по три известни от литературата математични модела за предсказване на този показател, а именно на Wes и др., на Schlünder и на Li и др. Това съвпадение е доказателство както за функционалната пригодност и точността на създадената опитна инсталация, така и за адекватността на използваната изчислителна процедура.
- 4) Констатирано е, че при нарастване на диаметъра на частиците, обработвани във въртящата се пещ, се понижава коефициентът на топлоотдаване от вътрешната повърхност на нейната стена към нагриваните в нея стъклени сфери.
- 5) Доказано е, че повишаването на скоростта на въртене на цилиндъра води до интензифициране на контактния

топлообмен с обработваните в него материали, независимо от техните топлофизични свойства.

б) Аргументирано е, че за математичното описание на топлоотдаването от стената на печта към нагриваните в нея частици трябва да се използват модели, отчитащи както диаметъра им, така и поръзността на слоя от тях.

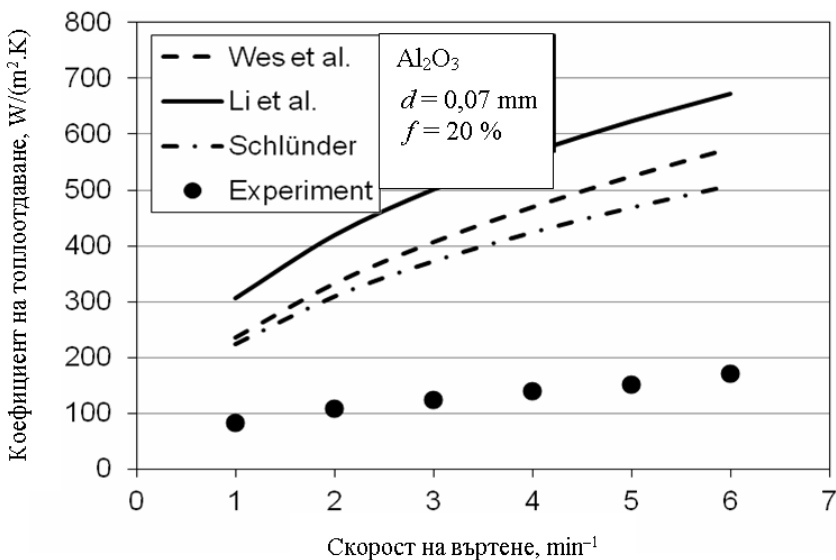
Глава 7. Контактен теплообмен във въртящи се пещи при други режими на движение на слоя

Последната, много съществена част от опитите цели установяване на влиянието на изброените по-горе фактори – скорост на въртене на печта, степен на запълването ѝ и диаметър на частиците, върху коефициента на топлоотдаване между вътрешната повърхност на цилиндъра и разположения в него с материал при най-неблагоприятните от гледна точка на преносните процеси движения на слоя, които могат да се появят при реални експлоатационни условия, като хлътващото и плъзгащото.

7.1. Опити с частици от Al_2O_3 , движещи се хлътващо

В съответствие с поставената цел, за да се осъществи хлътващо движение е необходим слой, който има по-голямо сцепление със стената на експерименталния стенд. След серия от опити за достигане на това движение, като оптимален материал е избран двуалуминиев триоксид (Al_2O_3).

На *фиг. 7.1* и *7.2* е показана зависимостта на коефициента на топлоотдаване, характеризиращ интензивността на контактния теплообмен между вътрешната повърхност на печта и обработваните в нея частици, от скоростта на въртенето ѝ, която е изменяна в интервала от 1 до 6 min^{-1} , и от степента на запълване на работното ѝ пространство с нагривания материал, възлизала при отделните опити на 10 % и 20 %.



Фиг. 7.1. Влияние на скоростта на въртене на пещта върху коефициента на топлоотдаване от стената към слоя от частици на Al_2O_3 при тяхното хлътващо движение и степен на запълване 20 %

За сравнение на този показател със стойности, изчислени по известни от литературата математични зависимости, са използвани отново трите модела за описание на контактния топлообмен във въртящи се пещи, а именно на Wes и др., на Schlünder и на Li и др. Тъй като те са изведени за най-често срещаното търкалящо движение, при останалите два изследвани режима могат да се очакват отклонения от получените въз основа на опитните данни коефициенти на топлоотдаване.

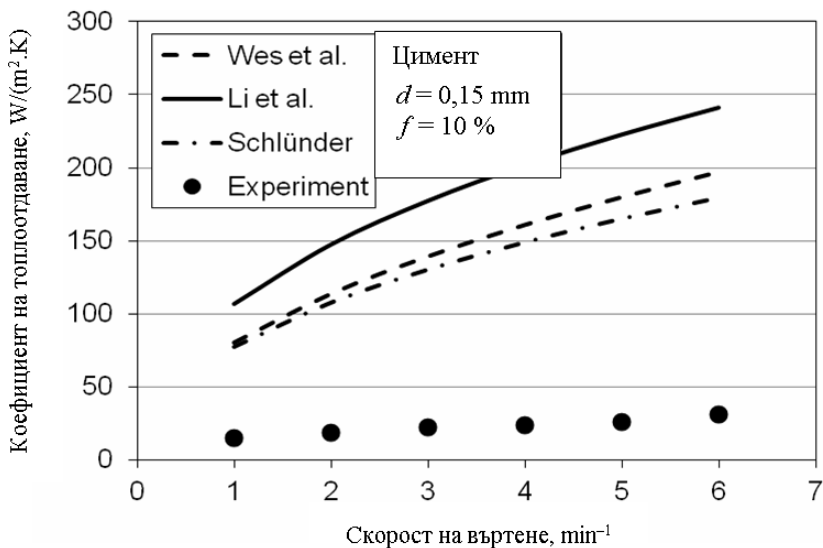
На *фиг. 7.1* е показана зависимостта на коефициента на контактен топлообмен между вътрешната повърхност на пещта и нагряваните в нея частици от Al_2O_3 с диаметър 0,07 mm при тяхното хлътващо движение от скоростта на въртене на цилиндъра при степен на неговото запълване 20 %.

7.2. Опити с цимент, движещ се плъзгащо

Както е споменато в увода и в раздел 1.1 на дисертационната работа, въртящите се пещи в миналото са били асоциирани само с производството на цимент. Въпреки същественото разширяване на сферата на тяхното приложение, което беше дискутирано по-горе, те и понастоящем остават основният агрегат за производството на този строителен материал. Това обикновено е свързано с необходимостта от развиване на високи температури на газовете в тях, често надвишаваща 1820 K, както е при изгарянето на клинкера. Ето защо, осъществяването на ефективно нагряване на материала във въртящите се пещи е от първостепенно значение за намаляване на топлинните загуби от тях. Както е подчертано вече, тези обстоятелства дори са довели до оформянето на мнение, че топлообменът има приоритет пред останалите явления, тъй като в много случаи той лимитира производителността на въртящата се пещи.

Изброените факти аргументират по безспорен начин целесъобразността на разширяването на настоящите изследвания и за случая на плъзгащо движение, което е характерно за слой от цимент и поради изложените аргументи се среща много често в практиката.

От *фиг. 7.2* може да се получи информация за зависимостта на коефициента на контактен топлообмен от вътрешната повърхност на индиректно нагрявания опитен цилиндър към обработваните в него циментови частици с диаметър 0,15 mm, осъществяващи плъзгащо движение. Степента на запълване на работното пространство отново е избрана 10 %.



Фиг. 7.2. Влияние на скоростта на въртене на пещта върху коефициента на топлоотдаване от стената към слоя от циментови частици при тяхното плъзгащо движение и степен на запълване 10 %

7.3. Дискусия на получените резултати при хлътващо и плъзгащо движение на слоя

Фиг. 7.1 и 7.2, отнасящи се съответно за частици от Al_2O_3 и хлътващо движение на слоя от тях при степен на запълване 20 %, и за цимент и плъзгащо движение при степен на запълване 10 %, показват, че промяната на вида на движението може да доведе до съществено разминаване между експерименталните и аналитично определените данни, тъй като използваните чужди модели са изведени само за търкалящо движение. Както се вижда от *фиг. 7.1*, при хлътващото движение, което е стъпката преди търкалящото движение, установеният въз основа на измерванията коефициент на топлоотдаване е по-висок в сравнение с този при плъзгащото движение (*фиг. 7.2*).

За да се добие представа какво е относителното отклонение между опитните данни и изчислените по всеки от трите избрани за сравнение модела, изведени за търкалящо движение, и дали то е постоянно, е пресметната неговата стойност за всяка от представените на *фиг. 7.1* и *7.2* точки. В *табл. 7.1* са показани осреднените отклонения между двата вида резултати.

С помощта на тези данни могат да се правят приблизителни оценки на очакваните коефициенти на топлоотдаване при хлътващо и плъзгащо движение, като се коригират изчислените стойности за тях по някой от предложените математични модели, отнасящи се за търкалящо движение.

Табл. 7.1

Относителни отклонения между определените въз основа на опитните данни стойности на коефициента на топлоотдаване и изчислените по известни от литературата модели

Отклонение от данните по модела на ↓	Движение →	Хлътващо движение	Плъзгащо движение
Wes и др.		69 %	84 %
Schlünder		66 %	82 %
Li и др.		75 %	87 %

7.4. Обобщение на изследването на контактния топлообмен в индиректно нагрявана въртяща се пещ при хлътващо и плъзгащо движение на слоя в нея

Резултатите от представените експерименти за изучаване на контактния топлообмен между външно нагрявана въртяща се

пещ и обработваните материали, движещи по различен начин в нея, могат да бъдат систематизирани така:

1) Установено е, че използването на аналитични формули за описание на контактния топлообмен във въртящи се пещи, когато движението на частиците не съвпада с това, при което са създадени съответните методики, може да доведе до съществени неточности в крайните резултати.

2) Определена е средната относителна грешка между опитни данни, получени при хлътващо и плъзгащо движение на слоя във външно нагривана въртяща се пещ, и изчислени стойности по три известни от литературата математични модела за предсказване на коефициента на контактен топлообмен между стената на цилиндричното работно пространство и обработваните в него материали, изведени за търкалящо движение.

3) Предложен е приблизителен метод за оценка на очакваните коефициенти на топлоотдаване при хлътващо и плъзгащо движение, като изчислените резултати за тях по някой от избраните математични модели за търкалящо движение се коригират със съответните средни относителни грешки между експерименталните и аналитично определените стойности на тези показатели. По този начин се разширяват значително възможностите за използване на известните от литературата модели да описание на контактния топлообмен в индиректно нагривани въртящи се пещи за проектиране на агрегати с по-малко изучените режими на движение на слоя в тях.

Глава 8. Обобщение на извършената работа и перспективи за бъдещи дейности

Систематизирането на проведеното експериментално изследване на преносните процеси, осъществяващи се във въртящи се пещи, а също и теоретичното интерпретиране на получените резултати с оценка на влиянието на най-важните фактори върху тези явления в рамките на целите, поставени в

дисертационната работа, може да бъде направено хронологично по следния начин:

- 1) Осъществен е преглед на съвременните въртящи се пещи, използвани в практиката, като са анализирани основните характеристики и възможностите за приложение на различните конструктивни варианти за тяхното оформление.
- 2) Систематизирани са нерешени към момента проблеми, свързани с движението на слоя във въртящи се пещи, с отклоненията на падащите частици от тях и с дебелината на пластове от дисперсен материал в тези агрегати, с контактния топлообмен във външно нагривани въртящи се пещи, а също и с горивните и топлообменните процеси в инсталации с директно отопление.
- 3) Създадени са два математични модела, засягащи поведението на материала в тръбна въртяща се пещ – съответно за предсказване на отклоненията на падащите частици от нейния корпус и за определяне на общата дебелина на слоя от обработван материал в агрегата и на активната част от него, наречен тотален модел.
- 4) Доказано е по теоретичен и експериментален път, че приетите предпоставки при разработените алгоритми отговарят на природата на описваните физични явления, и е обоснована тяхната практическа приложимост.
- 5) В резултат на проведените опити в празен агрегат е установено равномерно разпределение на наблюдаваните температури в достатъчен брой негови напречни сечения. Въз основа на това са направени изводи за правилното разполагане на горелката и за доброто функциониране на системата за измерване на температурите в отделните точки и позиции по дължината на цилиндричния му корпус.
- 6) Направен е критичен преглед на съществуващите аналитични методи за описание на топлообмена във въртящи се пещи и е обоснована необходимостта от поставяне на акцент върху индиректно нагриваните агрегати.
- 7) Създаден е алгоритъм за обработка на експериментални данни от изучаването на контактния топлообмен във външно отоплявани въртящи се пещи с цилиндрична форма.

8) В резултат на осъществените опити в подготвената от автора инсталация е установено, че с увеличаването на скоростта на въртене на агрегата се повишава коефициентът на топлоотдаване от стената му към нагривания в него кварцов пясък, а също, че колкото по-ниска е степента на запълване на пещта с материал, толкова по-силно изразена е тенденцията към нарастване на този показател с увеличаването на скоростта на въртене на цилиндъра.

9) Констатирано е, че получените експериментални стойности на коефициента на топлоотдаване от вътрешната повърхност на агрегата към обработвания в него кварцов пясък се съгласуват много добре с данните от изчисленията по три известни от литературата математични модела, а именно на Wes и др., на Schlünder и на Li и др. Това съвпадение е доказателство както за функционалната пригодност и точността на създадената опитна инсталация, така и за адекватността на използваната изчислителна процедура.

10) Установено е, че при нарастване на диаметъра на частиците, обработвани във въртящата се пещ, се понижава коефициентът на топлоотдаване от вътрешната повърхност на стената ѝ към нагриваните в нея стъклени сфери, а също, че повишаването на скоростта на въртене на цилиндъра води до интензифициране на контактния топлообмен с обработваните в него материали, независимо от техните топлофизични свойства.

11) Констатирано е, че математичното описание на топлоотдаването от стената на агрегата към нагриваните в него частици трябва да се извършва с помощта на модели, отчитащи както диаметъра им, така и порьозността на слоя от тях, създадени за съответния вид движение на материала, тъй като в противен случай може да се стигне до съществени неточности в крайните резултати.

12) Предложен е приблизителен метод за оценка на очакваните коефициенти на топлоотдаване при хлътващо и плъзгащо движение, като изчислените резултати за тях по някой от предложените математични модели за търкалящо движение се коригират със съответните средни относителни грешки между експерименталните и аналитично определените стойности на тези показатели, което разширява възможностите за използване

на известните от литературата методики за проектиране и оценка на функционирането на агрегати с по-малко изучените режими на движение на слоя в тях.

13) Формулирани са перспективите за бъдещи изследвания на преносните процеси във въртящи се пещи, които могат да бъдат осъществени както в опитните стендове, представени в дисертационната работа и използвани за реализирането на предвидените дейности в рамките на нейните цели, така и в проекти с по-широк обхват.

III. ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Научни приноси

1) Създадени са два математични модела, засягащи поведението на материала в тръбна въртяща се пещ – съответно за предсказване на отклоненията на падащите частици от нейния корпус и за определяне на общата дебелина на слоя от обработван материал в агрегата и на активната част от него, наречен тотален модел.

2) Генериран е алгоритъм за обработка на експериментални данни от изучаването на контактния топлообмен във външно отоплявани въртящи се пещи с цилиндрична форма.

3) Опитно е установено, че с увеличаването на скоростта на въртене на агрегата се повишава коефициентът на топлоотдаване от стената му към нагрявания в него кварцов пясък, а също, че колкото по-ниска е степента на запълване на пещта с материал, толкова по-силно изразена е тенденцията към нарастване на този показател с увеличаването на скоростта на въртене на цилиндъра.

4) Доказано е експериментално, че при нарастване на диаметъра на частиците, обработвани във въртящата се пещ, се понижава коефициентът на топлоотдаване от вътрешната повърхност на стената ѝ към нагряваните в нея стъклени сфери, а също, че повишаването на скоростта на въртене на цилиндъра води до интензифициране на контактния топлообмен с

обработваните в него материали, независимо от техните топлофизични свойства.

Научно-приложни приноси

1) Подготвени са, комплектовани са, пуснати са в експлоатация и са настроени две опитни инсталации за изследване на:

- движението на частиците и топлообмена в директно нагрявана тръбна въртяща се пещ,
- контактния топлообмен в индиректно нагрявана тръбна въртяща се пещ.

2) Констатирано е, че математичното описание на топлоотдаването от стената на агрегата към нагряваните в него частици трябва да се извършва с помощта на модели, отчитащи както диаметъра им, така и поръзността на слоя от тях, създадени за съответния вид движение на материала, тъй като в противен случай може да се стигне до съществени неточности в крайните резултати.

3) Предложен е приблизителен метод за оценка на очакваните коефициенти на топлоотдаване при хлътващо и плъзгащо движение, като изчислените резултати за тях по някой от избраните математични модели за търкалящо движение се коригират със съответните средни относителни грешки между експерименталните и аналитично определените стойности на тези показатели, което разширява възможностите за използване на известните от литературата методики за проектиране и оценка на функционирането на агрегати с по-малко изучените режими на движение на слоя в тях.

Приложни приноси

1) Създадените два математични модела, засягащи поведението на материала в тръбна въртяща се пещ, могат да се използват успешно за избор на подходящ експлоатационен режим за конкретните условия на функциониране на дадена тръбна въртяща се пещ и за установяване на разпределението на частиците върху транспортната лента, по която става

отвеждането им към консуматора, както и за прогнозиране на нейното натоварване.

2) Всички установени закономерности в поведението на коефициента на контактен топлообмен от вътрешната повърхност на индиректно нагрявана тръбна въртяща се пещ към обработвания в нея материал наред с научното, имат и чисто приложно значение, тъй като позволяват оптимизиране на експлоатационните разходи за инсталацията.

3) Предложеният приблизителен метод за определяне на коефициентите на топлоотдаване при хлътващо и плъзгащо движение на слоя в тръбни въртящи се пещи дава възможност за оценка на интензивността на контактния топлообмен в редица промишлени агрегати, които работят при тези режими, но все още не са изучени достатъчно.

Благодарности

Авторът изказва благодарност на всички колеги от катедра “Физична металургия и топлинни агрегати” на ХТМУ, както и на научния си ръководител доц. д-р инж. Райко Станев, за всестранната подкрепа, полезните консултации и съвети при оформянето на дисертационната работа. Той би искал да благодари и на проф. д-р инж. Екехард Шпехт, ръководител на катедра “Термодинамика и горене” към Университета “Ото фон Герике” в гр. Магдебург, Германия, а също и на сътрудниците на Института по механика на флуидите и термодинамика към същия университет за предоставената експериментална база.