

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Кръстин Красимиров Йорданов

Заглавие:

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ТЕРМИЧНИ РЕЖИМИ НА ПЕЩИ
КАМЕРЕН ТИП ЗА ТЕРМИЧНА ОБРАБОТКА**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „доктор“**

**по докторска програма: ш. 02.06.01 „Теоретична топлотехника“
към професионално направление: 5.4 „Енергетика“**

Научен ръководител: доц. д-р инж. Илия Иванов Хаджидимов

Рецензенти:

1.
2.

Варна, 2017 г.

Дисертационният труд е обсъден на в катедра
„Топлотехника“ и е насочен за защита.

Докторантът работи в катедра „Топлотехника“

Автор: инж. Кръстин Красимиров Йорданов

Заглавие: Идентификация на термични режими на пещи камерен тип за термична обработка

ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА

инж. Кръстин Красимиров Йорданов

Заглавие:

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ НА ТЕРМИЧНИ РЕЖИМИ НА ПЕЩИ
КАМЕРЕН ТИП ЗА ТЕРМИЧНА ОБРАБОТКА**

АВТОРЕФЕРАТ

**на дисертация за получаване на образователна и
научна степен „доктор“**

Варна, 2017 г.

Дисертационният труд съдържа 184 страници, включително 71 фигури, 28 таблици и 3 приложения, оформени в 6 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 130 заглавия, от които 74 на кирилица и 56 на латиница.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на г. от ч. в на открито заседание на жури, сформирано със заповед на Ректора №/..... г.

Материалите по защитата (дисертацията, рецензиите и становищата) са на разположение на интересувашите се във ФД “Докторанти”, стая 318 НУК

I. ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

1. Актуалност на проблема

Методите на термообработка в камерни пещи като метод за обработване на детайли са намерили широко приложение в световната промишленост. Те се оказват икономически ефективен метод за високопроизводителна обработка в сравнение с други методи на термообработка. Въпреки широката им употреба, все още обаче няма достатъчно данни за причинно – следствените връзки, определящи оптималните режими на работа. Причините са начините за енергийно въздействие върху обектите на термична обработка в пещта, свеждащи се до въздействие с определено количество топлина. Следствието е разпределение на температурно поле в обектите на термообработка, което трябва да отговаря на условия, определящи необходимите технологични параметри. Така се налага решаване на т.нар. идентификационна задача, която е свързана до определяне на причините (топлинното въздействие) по известно или част от него следствие (температурно поле). От математическа гледна точка идентификацията се свежда до решаване параметрична обратна задача на топлопроводността, при която по известно температурно поле се търсят условията за еднозначност – гранични и начални при нестационарна задача. Въпреки разнообразието от фирми доставчици на оборудване и с препоръчителни уреди за измерване на физичните параметри при термообработка, все още се търси оптимално решение за такъв вид системи.

2. Проблем

Идентификацията на режимите за термообработка, както и научно – техническите постижения в областта на топлотехническите изследвания на пещите за термообработка очертават метода като активно развиващ се в областта на закаляване на изделията, осигуряващи по – висока надеждност и дълготрайност на механизмите и машините.

Основният проблем е в липсата на конкретни данни за параметрите на термичните режими на пещите от камерен тип и използваната апаратура за тяхното измерване най – вече поради фирмени тайни. Няма достатъчно информация за взаимовръзката между технологичните параметри на режима на термообработка и качествените показатели на изделието. Недостатъчно са данните за влиянието на температурата и топлинните потоци върху конструктивните и технологични параметри на камерни пещи за термообработка, тяхната производителност и ефективност.

3. Цели и задачи на изследването

Основната цел на дисертационния труд е идентификация на термични режими на пещи камерен тип за термична обработка чрез изследване на топлообменните процеси на нагриване и охлаждане.

Постигането на тази цел е свързано с решаване на следните основни задачи:

1. Създаване на методика за анализ на процесите в пещи от камерен тип с цел подобряване на тяхната производителност, оптимизация на технологичните процеси на термообработка в тях с възможности за проектиране на пещи със специфични изисквания към тях и обектите на термообработка, както и намаляване на енергийните разходи.
2. Методиката да бъде изградена на база комплексен числен модел на камерна пещ, включващ както моделиране на процесите в пещта, така и отчитане параметрите на околната среда с цел получаване на адекватно решение на модела с достатъчна точност. Численият модел включва диференциалното уравнение на нестационарната топлопроводност за процесите в пещта и допълнителни ограничения за влиянието на околната среда. За получаване на термичните режими на пещта с цел оптимизация на процесите в нея, със създадения модел да се извърши параметрична идентификация за определяне на причините, предизвикващи разпределението на температурата в пещта – топлинните потоци в нестационарния процес.
3. За решаване на обратната задача да бъде използван измервателен комплекс за получаване на всички необходими данни за коректното формулиране на правата задача на топлопроводността – гранични и начални условия. Основна цел на измервателния комплекс е да бъдат измервани температури в достатъчно голям брой точки на пещта, които да бъдат използвани като база за минимизация на грешката, т.е. разликата между измерени и моделни температури.
4. На базата на проведени експерименти да се натрупа статическа информация за различни режими на работа на камерни пещи.
5. Да се извърши анализ на моделните пресмятания с цел намиране оптималните зони в пещта за конкретен вид термообработка след решаване на задачата за идентификация на термичния процес. Резултатите да бъдат съпроводени със статистически анализ за обобщение на режимите на термообработка.

4. Обект и предмет на изследване

Обект на изследване се явява идентификация на параметрите на камерна пещ в режим на празен ход и работен режим на термообработка при три температурни диапазона с различен брой заготовки.

За нуждите на експерименталното изследване е избрана камерна пещ „Токмет“ за термообработка с номинална мощност от $P=6\text{kW}$, габаритни размери на пещта $L \times B \times H$ $520 \times 645 \times 610\text{mm}$ и размери на пещното пространство $l \times b \times h$ $400 \times 400 \times 400\text{mm}$.

Практиката е доказала температурните диапазони за успешен технологичен процес. Ето защо нагряването на детайлите в камерна пещ, водещо до уякчаващ ефект, би следвало да се очаква да протича при температури в интервала от $500^{\circ}\text{C} \div 900^{\circ}\text{C}$.

Обектът може да се управлява, ако бъде приведен в кое да е от неговите различни състояния, при това поддържано с определена точност за определено време. Това качество позволява да се провеждат „активни“ експерименти.

Степента на възпроизводимост на резултатите е друго важно свойство на обекта. За оценяването му е необходимо да бъдат проведени серия паралелни експерименти при едно и също състояние, но в различни моменти от време.

5. Методи на изследване

Методите, чрез които са постигнати поставените задачи в дисертацията, включват:

- Математичен модел на нелинейна нестационарна права задача на топлопроводимостта в непрекъснати среди, която включва параболичното уравнение на топлопроводимостта и условията за еднозначност, в това число гранични и начални условия, обезпечаващи съществуването и единствеността на решаването на задачата;
- Проектиране и изработване на система за измерване на температури при високотемпературно нагриване и охлаждане на камерна пещ за термообработка и експериментално определяне на термичния цикъл на зададени точки от изследвания обект, измерване силата на тока и напрежението и отчитане на параметрите на околната среда;
- Планиране на експеримента с процедура за избор на броя и условията на провеждане на опитите, необходими и достатъчни за решаване на поставената задача с необходимата точност;
- Провеждане на експериментални изследвания, идентификация и верифициране на направените математични модели с помощта на съвременни софтуерни продукти, отговарящи на целта и задачите.

6. Място на изследване

Изследванията, представени в дисертацията, са проведени на следните места:

- Технически Университет – Варна, България – кат. Топлотехника, лаборатории „Възобновяеми енергийни източници“, „Горивна техника и технологии“ и „Материалознание“ към катедра „МТТ“;

7. Научна новост на изследването

Изследванията, направени в дисертацията изясняват и онагледяват възможностите за съвкупно решаване на задачи, както конструктивно при пещи с електросъпротивително нагриване, така и извършваната термообработката в тях.

Разработени са компютърно – симулационни модели на камерна пещ в режим на празен ход и в работен режим чрез изчислителен комплекс на нелинейната права

задача на топлопроводността, като адекватно са пресъздадени резултатите от експеримента.

Предложени са схеми на модули за измерване на физични величини – температура, сила на тока, напрежение, относителна влажност и барометрично налягане. Създадени са електронни модули за съответната величина и са интегрирани в измервателна система.

Създаден е специализиран софтуер за отчитането и записването на стойностите от експеримента. Предложено е решение за съвместното им използване и записване във времето без да има изместване при отчитането на показанията от отделните модули.

Създаден е специализиран софтуер за експериментално – статистическо изследване при планиране на експеримент с определяне на регресионни коефициенти, уравнения и визуализация на съответните диаграми.

8. Практическа полза на изследването

Предложените модели, симулации, постановки и експерименти могат да се използват при решаването на конкретни инженерни задачи. Интерес представлява възможността паралелно да се провеждат и научни изследвания за методите на термообработка на металите в електросъпротивителни пещи от камерен тип. Те отговарят на редица неясни до момента въпроси, свързани с производителността, качеството на повърхнините и определяне влиянието на най – важните фактори върху самия процес на термообработка, оборудването и технологията. Необходимостта от изследвания в тази област е наложителна, тъй като през последните години се разработват и намират приложение високопроизводителни методи и апаратури за термообработка с тенденция към намаляване консумацията на енергия. Някои от методите за термообработката на металите и техните сплави в електросъпротивителни пещи от камерен тип не са намерили широко практическо приложение поради редица проблеми, които забавят и ограничават приложението им. Това са все още неуточнените до момента конструктивни параметри на елементи от агрегата за термообработка, неговите технологични и ресурсни възможности и не на последно място термичните режими при всеки един метод на термообработка. Решаването на тези въпроси е особено важно като се има предвид, че вече са налице реални технически и технологични предпоставки за практическа реализация – високо ниво на познанията в областта на техниката и технологията, наличие на съвременен и модерен оборудване за анализ и контрол на процесите и режимите, развита материална база и подготвени специалисти. Това дава основания за изготвяне на целенасочена програма за реализация на пещи за термообработка на металите, за изследване на технологичните и ресурсни възможности с цел достигане до промишлен образец, който да задоволи потребностите на ведомства, фирми и организации, занимаващи се с този вид дейност. В настоящата работа до момента е направен опит да се обобщат

достиженията в областта на термообработката на металите в електросъпротивителни пещи от камерен тип, да се доразвият съществуващи и генерират нови идеи, като целта е усъвършенстване на пещта за термообработка, идентификация на технологичните и режимни параметри на процесите и провеждане на редица изследвания, свързани с ефективността на процесите. Това води до усъвършенстване на практическото приложение на методите за термообработка в електросъпротивителни пещи от камерен тип, както и методите и средствата за контрол на физичните величини по време на този вид обработка.

9. Аprobация на изследването

Основните резултати от изследванията са докладвани и публикувани в следните научни форуми и издания:

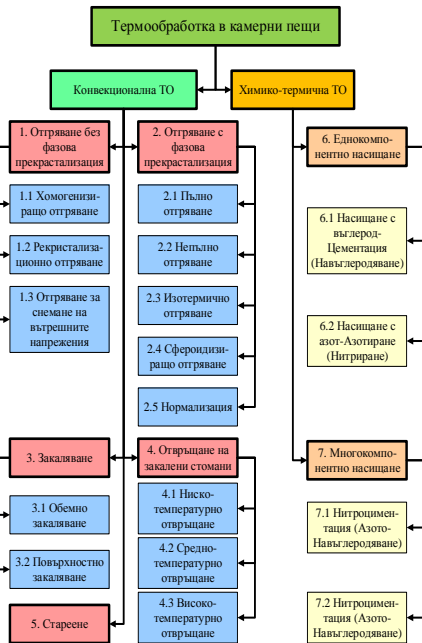
- 1 доклад на конференция с международно участие „Компютърни науки и технологии“, Варна 2014 г., България, ISSN 1312-3335;
- 1 доклад в сборник на Научни трудове - Русенски университет „Ангел Кънчев“ – 2015 – Топлотехника, хидро- и пневмотехника, Русе 2015, ISSN 1311-3321;
- 2 доклада на конференция „Дни на механиката“ към ННТД по ТММ, Варна 2016, ISSN 1314-2550;
- 1 доклад на интернационална конференция „TE-RE-RD 2016“, Варна 2016, България, ISSN 2359-7941;
- 1 доклад в сборник на Научни трудове - Русенски университет „Ангел Кънчев“ – 2016 – Топлотехника, хидро- и пневмотехника, Русе 2016, ISSN 1311-3321;
- 1 статия в списание „Машиностроителна техника и технологии“, НТС, ТУ-Варна, 2016, ISSN 1312-0859.
- Работата е одобрявана периодично и като цяло на заседания на катедра „Топлотехника“ при КФ на ТУ-Варна.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Глава 1: Особенности на камерни пещи и идентификация на термичните режими

В прегледа на литературата са изложени приложенията на електросъпротивителни пещи от камерен тип в индустрията по отрасли и къде най – често се срещат, а именно в стоманопереработваща индустрия, стъklarската промишленост, керамичното производство, в машиностроенето и др. Описани са видовете пещи в промишлеността, които се използват и възможните реконструкции с цел намаляване на топлинните загуби.

Анализирани са технологичните параметри и методи при термообработка в пещи от камерен тип и в резултат на това е установено, че при използване на методите за термообработка се повишава технико – икономическата ефективност на производството и наличието на голям интерес по отношение на конвенционалните методи за термообработка на различни метали и техните сплави в електросъпротивителни пещи от камерен тип. Отделени са факторите, които обуславят технологичните параметри на образците и пещта: вид на материала, предварителна обработка на материала, разстояние на нагревателите до метала, температура на материала, конструктивни параметри на пещите и технологични параметри на пещта, които спомагат за коректна идентификация на обектите.



Фиг.1.1. Класификация на методите за термообработка на металите

Детайлно са анализирани методите за термообработка в електросъпротивителни пещи от камерен тип и положителните резултати, които биха се постигнали при оптимизиране на технологичните процеси. Подробно са представени за всеки метод неговото практическо приложение, режимните му характеристики за дадения температурния интервал в който се осъществява.

В литературният обзор особено значение е отделено на определяне на рационалните (оптимални) параметри на температурното поле и параметрите на температурно въздействие чрез методите на математическо моделиране. Осигурено е поддържане на зададените параметри на топлинно

въздействие в продължение на реалния процес на топлинна обработка чрез създаване на математически модел на топлинния процес. Представени са процесите на нагриване и охлаждане на материалите както и резултати от пресмятанятия чрез методите за математическо моделиране. Направена е идентификация на топлините процеси на база експериментални данни за технологичния процес.

Обобщения и изводи

От направеното литературно проучване се установи, че методите на термообработка в камерни пещи като методи за обработване са намерили широко приложение в световната промишленост. Те се оказват сравнително добър икономически ефективен метод за високопроизводителна обработка в сравнение с другите методи на термообработка. Под идентификация на оптимален режим се има предвид определяне на причините, определящи следствието в технологичен режим на термообработка в камерни пещи. Причините са начините за енергийно въздействие върху обектите на термична обработка в пещта, свеждащи се до отделяне на определено количество топлина. Следствието е разпределението на температурата в обектите на термообработка, определящо технологичните им свойства. От математическа гледна точка идентификацията се свежда до решаване параметрична обратна задача на топлопроводността по известно температурно поле да се определят причините, които го пораждат, а това са условията за еднозначност – гранични и начални при нестационарна задача.

Като заключение върху направения обзор и анализ на досегашните научни изследвания на проблема, са направени следните обобщения и изводи, изясняващи нерешените проблеми в разглежданата тематика:

1. Идентификацията на режимите за термообработка, както и научно – техническите постижения в областта на топлотехническите изследвания на пещите за термообработка очертават метода като активно развиващ се в областта на закаляване на изделията, осигуряващи по-висока надеждност и дълготрайност на механизмите и машините.
2. В литературата, най – вече поради фирмени тайни се срещат сравнително малко данни за параметрите на термичните режими на пещите от камерен тип и използваната апаратура за тяхното измерване.
3. В съществуващите литературни източници няма достатъчно данни за взаимовръзката между технологическите параметри на режима на термообработка и качествените показатели на изделието.

Недостатъчно са данните за влиянието на температурата и топлинните потоци върху конструктивните и технологични параметри на камерни пещи за термообработка, тяхната производителност и качеството на детайлите.

Глава 2: Методики за провеждане на научните изследвания

2.1. Математичен модел на нелинейна нестационарна права задача на топлопроводимостта

Обобщеният математически модел на нелинейна нестационарна права задача на топлопроводимостта съдържа диференциалното уравнение на топлопроводимостта на твърдо тяло, както и уравненията Навие – Стокс за описване на флуидните среди около всички повърхнини на твърдото тяло.

Математическият модел на правата задача на топлопроводимостта в непрекъснати среди включва параболичното уравнение на топлопроводимостта и условията за еднозначност, в това число гранични и начални условия, обезпечаващи съществуването и единствеността на решението на задачата. Правата задача на топлопроводимостта се състои в определяне на температурата като функция на пространствените координати и времето при зададените условия.

Управляващите частни диференциални уравнения са дискретизирани чрез използване метода на крайните елементи. Полученият набор от алгебрични уравнения трябва се решава за дадени стойности на променливите, които се определят във възлите на крайните елементи.

При естествената конвекция се генерира движението на флуидите или преобладаващите температурни разлики, от които зависят параметрите на флуида, най-вече плътността. Тези потоци също са посочени като основни (задвижващи) потоци, защото периодът на гравитацията или подвижността в моментните уравнения доминира над потока. Обратното на дотук казаното е принудената конвекция на топлинните потоци, където преобладава движението на флуида и подвижността му с малък или много слаб ефект.

Първата задача за решаване чрез дискретизирани уравнения е липсващото налягане. Ако моментните уравнения се използват за изчисляване на компонентите на скоростта, след това се прилагат за определяне на налягането чрез уравнението за непрекъснатост. Въпреки това, налягането никога не се изписва в уравнението за непрекъснатост. Има множество възможности за заобикаляне на числените проблеми при определяне на налягането. Много от тези методи за решаване изискват уравнението на непрекъснатост и моментното уравнение да бъдат решени едновременно във всеки възел от мрежата за краен елемент. За по-прости задачи, това решение е напълно достатъчно, но за сложни реални задачи този подход не е приложим.

2.2. Методика за идентификация на термичните режими в камерна пещ

Идентификацията на участващите обекти/елементи (обработван метал, режими и условия на работа) е първична и сравнително лесно осъществима процедура. Идентификацията на съставляващите явления, както на правите или обратни връзки

между компонентите в информационния модел, е вторична. Тази идентификация изразява външното и/или вътрешното описание на системата с управляващите, контролираните и смущаващите фактори върху параметрите на процеса на термична обработка. Това описание може да бъде в дискретно или непрекъснато време. Идентификацията е винаги непрекъсната и итеративна и се осъществява докато се получи по – ефективно управление на системата, по – добра оценка на коефициентите и адекватен статистически модел с определена точност.

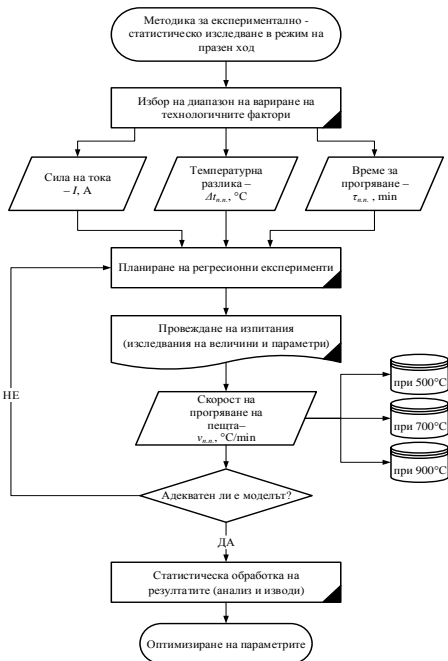
Благодарение на идентификацията се получава необходимата информация за анализа и синтеза на процеса на термообработка, въпреки че тя е непълна. Това е процедура, която започва от априорно – интуитивното знание и впоследствие се допълва или коригира с апостериорна съдържателно – логична информация за процеса на термообработка.

2.3. Експериментално – статистическо изследване параметрите на режима

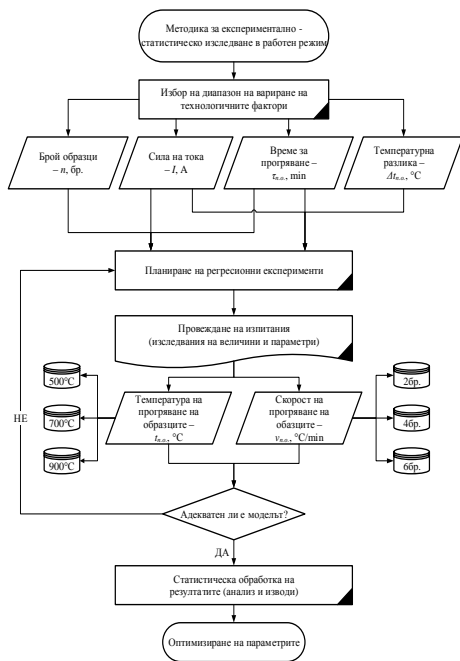
Планирането на експеримента е процедура за избор на броя и условията на провеждане на опитите, необходими и достатъчни за решаване на поставената задача с необходимата точност. Във връзка с това трябва да се очаква, че функцията на отклика ще бъде нелинейна за изучаваната област на междуфакторното пространство и се избира за решаване квадратичен модел. При избора на конкретен план за експеримент се налага компромис в изискванията за: точност на математическото описание на процеса; простота на обработка на експерименталните данни; минимален брой експерименти. Разглежда се план на експеримента за построяване на модел от II ред. Освен това е необходимо всеки фактор да се изменя на не по – малко от три нива. Един от най – икономичните по броя на опитите планове са предложени от Хартли, Рехтшафнер. Задачата са състои в проверка на хипотезата за равенство на дисперсиите при експерименти, съответстващи на точките (редовете) от матрицата на планиране.

2.4. Разработване на методика на планирания експеримент за набиране на информация за идентификацията

Целта на методиката е да се определи влиянието на режимите в камерна пещ при режим на празен ход и работен режим на термообработка в три температурни диапазона и с различен брой образци. Да се оптимизират режимните параметри по експериментален път като се използват методите на планиране на експеримента и математическата статистика. На фиг. 2.1 е представена схема на методика за експериментално – статистическо изследване в режим на празен ход на камерна пещ, а на фиг. 2.2 е показана схема на методика за експериментално – статистическо изследване в работен режим.



Фиг.2.1. Методика за експериментално – статистическо изследване в режим на празен ход на камерна пещ



Фиг.2.2. Методика за експериментално – статистическо изследване в работен режим на камерна пещ

Процесите за термична обработка на детайли се нуждаят от още редица изследвания, които да уточнят технологичните им възможности. Това може да се осъществи сравнително бързо по експериментален път, като се използват методите за планиране на експеримента и математическата статистика. Използва се натрупаният опит в това направление, с помощта на който са съставени и настоящите методики.

Обект на изследване се явява идентификация на параметрите на камерна пещ в режим на празен ход и работен режим на термообработка при три температурни диапазона с различен брой заготовки. Изследва се нагряването по надлъжното и напречното им сечение, времето за достигане на зададената температура на детайлите в камерна пещ, водещо до увеличаване на производителността на процеса и определяне на оценка за ефективността на пещното пространство.

Експериментите са проведени на базата на приетия централно композиран план при избраните фактори и нива на вариране. Избран е централно композиран план на експеримента от втори ред – план на Рехтшафнер за три фактора с единадесет опита.

В съответствие с препоръките, които се дават в специализирана литература на основание изследванията на редица автори и на собствени предварителни

експерименти, е направен избор на най – значимите и съвместими фактори. За целта се варира с три технологични фактора и се оценява влиянието им върху производителността на пещта в режим на празен ход, чрез скоростния параметър, температурата и скоростта на прогряване на образци в работен режим на детайли с еднакви размери, нагривани в камерна пещ.

Извършена е проверка за възпроизводимост на експеримента, определени са коефициентите и тяхната значимост и е направена оценка за адекватността на моделите.

Критерий за оценка на обекта е точността при идентификацията на термични режими в камерна пещ, свързан с измерване на технологични параметри на режимите, необходими при създаването на компютърни симулационни модели на обекти с подобен електросъпротивителен източник на топлина. Чрез тях се постига необходимото подобряване на производителността на процесите и увеличаване ефективността при термообработката на машинните части и инструменти.

Термообработката на металите и сплавите се осъществява чрез нагриване до висока температура или в температурни интервали и задържане при тези температури определено време. Това води до изменение в структурата на повърхностните слоеве, което позволява в твърде широки граници да се променят свойствата на металите и сплавите.

В преобладаващата част от случаите на термообработката на детайли в камерна пещ целта е да се намали в максимална степен влиянието на страничните фактори върху изходните параметри на процесите и да се определят оптималните условия на работа в температурния интервал от 500°C÷900°C.

За нуждите на експерименталното изследване бе създадена и изработена комбинирана система за измерване на физични величини, с помощта на която бяха измерени всички параметри участващи в процесите. Измерването на температурата се осъществява с помощта на термодвойки тип К, силата на тока с токови трансформатори (амперклеци), а параметрите на околната среда със сензори за измерване на околна температура, относителна влажност и барометрично налягане. Резултатите от изследването се записват от компютърна система с разработен софтуер за приемане и обработка на данните от експеримента.

Резултатите от измерванията и изследванията се представят във вид на таблици, графики и снимков материал. Прави се анализ на получените резултати, като се дават оценки с препоръки в съответствие с приетите критерии и забелязаните тенденции.

Глава 3: Комбинирана система за измерване на температура, ток, напрежение и параметри на околната среда

Експериментално определените стойности са използвани за итеративно решаване на обратната задача на топлопроводността, свързано със сравняване на моделните и експерименталните параметри на процеса. При численото решаване на задачи на топлопроводността от решаващо значение е точното определяне на граничните условия. Колкото по – точно са дефинирани, толкова по – точно ще бъдат пресметнати моделните температурни полета. По този начин численото решение на задачата би довело до достигане на адекватен модел с определена точност по отношение на критерия за решаване на обратната задача.

За реализация на дискретния модел е създадена електронна апаратура за измерване на високи стойности на температура, сила на тока, напрежение и параметри на околната среда и компютърна система за обработка и анализ на получените резултати от измерването.

3.1. Измерване на температурата чрез контактни чувствителни елементи

Целта е създаване на измервателна система, която да бъде използвана в методиката за определяне на топлинните полета и скоростните потоци на флуиди в затворен обем.

3.1.1. Електронен модул за измерване на температури

Проектиран и създаден е модул за измерване на температури при високотемпературно нагриване и охлаждане на камерна пещ за термообработка и експериментално определяне на термичния цикъл на зададени точки от изследвания обект.

Устройството за измерване е проектирано на базата на познания в областта на електрониката и необходимостта от измерване на висока температура до 16 стойности. За целта е използвана платформа Arduino UNO с 10 битов АЦП (аналогов цифров преобразовател), цифров преобразовател за усилване на е.д.н. (електродвижещо напрежение) – MAX31855 на термодвойки тип К - хромел-алумел (NiCr-NiAl) и 16 канален аналогов мултиплексор 74HC4067. Към схемата е прибавено и второ Arduino NANO на самостоятелна платка с нужната периферия към него за предаване чрез USB данните към компютър. Схемата на модула е създадена чрез софтуерен продукт Altium Designer, (фиг.3.1.г), а за проектирането на кутията със елементите е използван софтуерен продукт Autodesk Inventor, (фиг.3.1.а) и б).

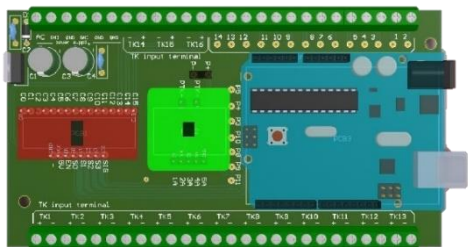
Основната причина за използването на ARDUINO платформата е наличието на отворен код, ниска цена и наличието на достатъчен брой аналогови и цифрови входове/изходи, което прави платформата подходяща за реализиране на различни задачи. Към ARDUINO могат да се включат различни чувствителни елементи за измерване и управление на процеси. Софтуерният продукт е с възможност за свободно

програмиране, което дава възможност за индивидуална настройка на сензорите и честотата на предаване на данни, фиг.3.1.в).

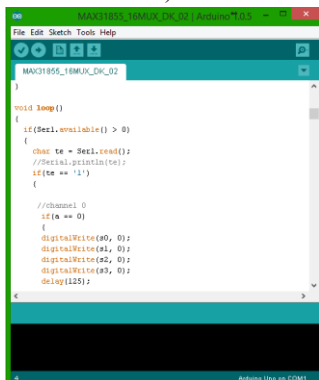
След обстоен преглед на наличните библиотеки и код от производителите на елементите на MAX31855 и мултиплексор 74HC4067 е генериран код, който е обединен и преработен за да може данните да се приемат от софтуерен продукт LabVIEW. Преработена е библиотеката на MAX31855, т.к. заложената линеаризация на температурата спрямо напрежението дава отклонения в резултата.



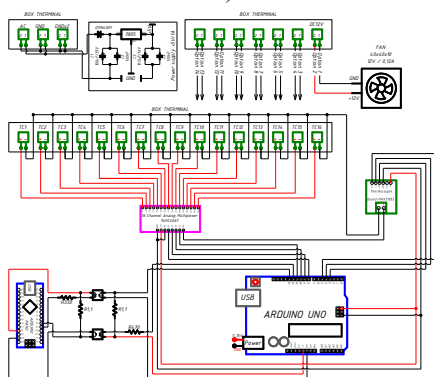
а)



б)



в)



г)

Фиг.3.1. Проект на модул за измерване на 16 температури с термодвойки тип К

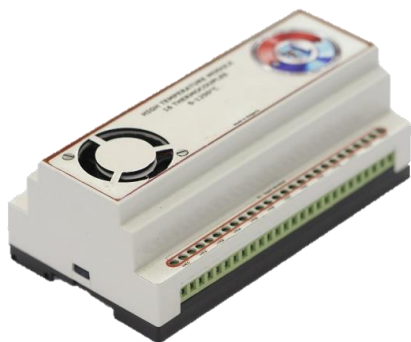
а) Изглед на кутията в 3D; б) Изглед на основата с елементи;

в) Софтуерният продукт; г) Схема на модул за измерване на 16 температури

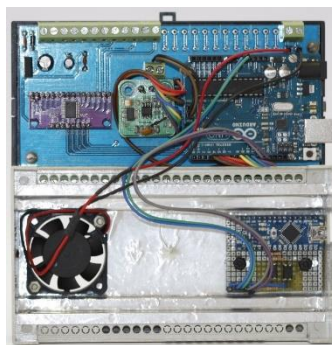
След проучване на литературни източници, за по – точна линеаризация на преобразуване на напрежението в температура и намаляване на грешката от измерване е представено уравнение от „Националния институт по стандартизация“ или „NIST ITS-90 Thermocouple“. Предоставената рационална полиномна функция от „NIST ITS-90 Thermocouple“ е във вида:

$$t = t_0 + \frac{(v-v_0)(p_1+(v-v_0)(p_2+(v-v_0)(p_3+p_4(v-v_0))))}{1+(v-v_0)(q_1+(v-v_0)(q_2+q_3(v-v_0)))}, \quad (3.1)$$

На фиг.3.2.а), б) и в) е представен модулът за измерване на 16 температури с термодвойка тип К в завършен вид.



а)



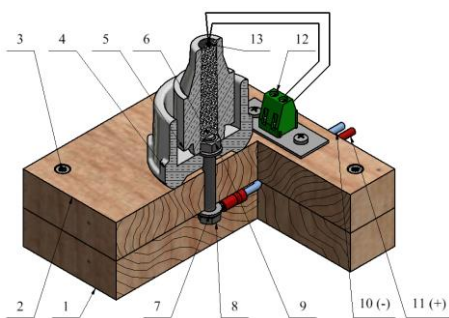
б)

Фиг.3.2. Модул за измерване на 16 температури с термодвойка тип К

а) Изглед от страни; б) Изглед отвътре

3.1.2. Изработка на термоелектрически пирометри (термодвойки тип К)

За точно измерване на температурите и определяне на термично е.д.н се използват термоелектрически преобразуватели. За направата на термодвойките тип К е разработено приспособление за спояване на проводниците хромел-алумел показано на фиг.3.3а) и б).



а)



б)

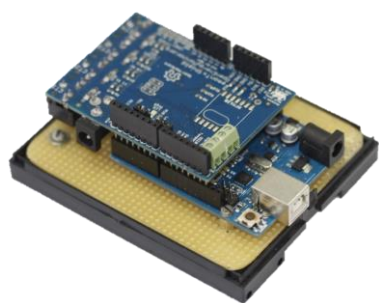
Фиг.3.3. Приспособление за запояване на термодвойка тип К

а) Проектно изпълнение на приспособлението; б) Изработено приспособление
 1,2) Изолиращи дървени основи; 3) Винт за дърво; 4)Керамична капачка за предпазител; 5)Керамичен предпазител; 6)Графитен прах; 7)Шайба М5; 8)Болт М5; 9)Гайка М5; 10)Проводник с кабелна обувка; 11)Проводник; 12)Клема; 13)Термодвойка

Преимущество на приспособлението е неговата проста конструкция. Като недостатък може да се спомене, че графитният прах от изолатора може да попадне в разтопения метал на проводниците и да замърси чувствителния елемент.

3.2. Измерване сила на ток и напрежение

За измерване на променливия ток и напрежение в системата е използван модул EmonTx Arduino Shield SMT – Open Energy Monitor. Той има възможност за измерване успоредно на 4 токови трансформатора, работещи с ампер клещи модел YHDC SCT-013-000. Уредът е предназначен за прецизни измервания на реалната стойност на тока и напрежението. Обхватът за измерване е до 100A и напрежение до 250V. На фиг.3.4. а) е показан модулет EmonTx Arduino Shield SMT монтиран върху ARDUINO UNO.



в)



г)

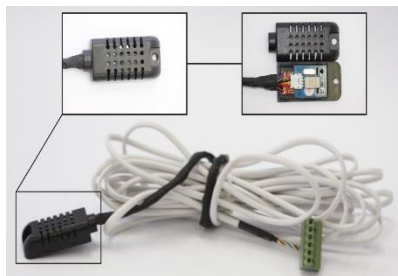
Фиг.3.4. Модул за измерване на ток и напрежение с 4-ри токови трансформатора в диапазон 0÷100А: а) Изглед отвътре; б) Изглед отляво

3.3. Измерване на температура, относителна влажност на околния въздух и барометрично налягане

Към създадената микропроцесорна система могат да се включват най-различни аналогови и цифрови елементи, например цифрови термометри DS18B20, PVDF сензори, които могат да се използват за измерване на шум, вибрации, топлина, барометрично налягане, относителна влажност на въздуха и др.

В настоящата работа са използвани допълнителни чувствителни елементи за измерване на температура, относителна влажност на въздуха и барометрично налягане. Тези параметри са необходими като входни данни в комплексния математичен модел, който се решава в дискретен вид.

На фиг.3.5 а) и б) е показан модулет за измерване на температура на околния въздух, относителна влажност и барометрично налягане на базата на ARDUINO NANO.



а)



б)

Фиг. 3.5. Модул за измерване параметри на околната среда

а) Цифров сензор за измерване на температура, относителна влажност и атмосферно налягане; б) Изглед отвътре

3.4. Комбинирана система за измерване на температура, ток, напрежение и параметри на околната среда

Целта на комбинираната система е да обедини отделните модули представени по – горе, осигуряване на общо управление и интерфейс с един компютър и общо захранване.

Модулите за измерване параметрите на режима и околната среда са монтирани в обща кутия със собствено захранване, отделно от електрическата мрежа. По време на процеса на отчитане се осъществява запис, като за целта се използва компютър и софтуер, разработен посредством специализиран продукт LabVIEW.

Проектирането на комбинираната система чрез софтуерен продукт Autodesk Inventor и нейните компоненти са показани на фиг.3.6 а) и б), а изработената система на фиг.3.7 а) и б).



а)



б)

Фиг.3.6. Проектирана комбинирана система

а) Изглед отвън; б) Изглед отвътре



а)

б)

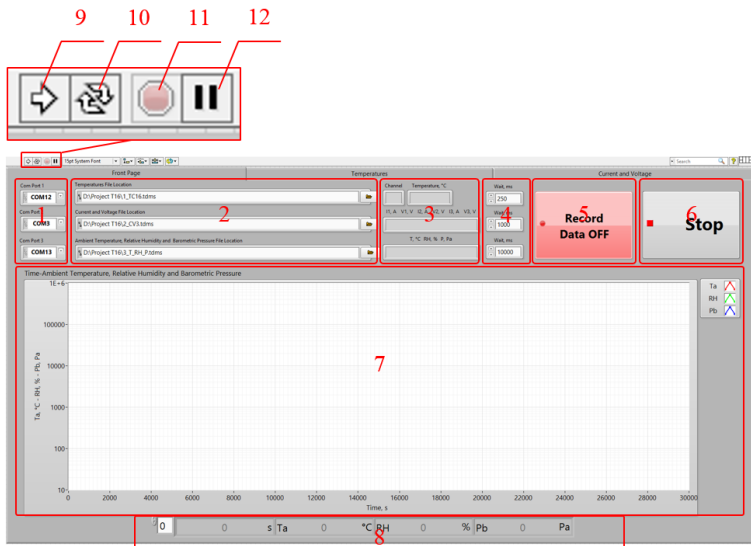
Фиг.3.7. Комбинирана система

а) Изглед отвън; б) Изглед отвътре

Данните, получени от серийните интерфейси на модулите се предават за по – добра визуализация в програмна среда LabVIEW, като резултатите от изпитванията се представят в табличен и графичен вид.

3.5. Разработване на софтуер за запис и обработка на експерименталните данни от комбинираната система

За създаване на софтуер, е използван специализиран продукт LabVIEW, който представлява графична програмна среда на National Instruments. Програмата LabVIEW съдържа пълноценна развойна среда с много библиотеки и инструменти.



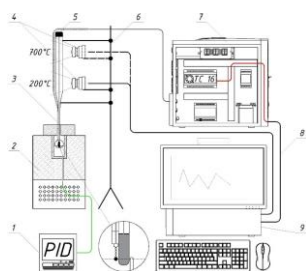
Фиг.3.8. Преден панел на софтуер за запис и обработка на експерименталните данни

На фиг.3.8 е показан предния панел, в който за по – лесна работа на оператора е разделен на осем зони. В зона 1 се избира съответния СОМ порт на измервателните модули, свързани към компютъра. В зона 2 се задава директорията за запис и името на файла от съответния СОМ порт. Зона 3 визуализира получените стойности от модулите със съответната размерност. Времето, през което се отчита сигнала от СОМ портовете в ms на системата се задава в зона 4. След стартиране на програмата с (9) се включва бутонът за запис, оказан в зона 5. Графичното изобразяване на резултатите постъпили от модула се визуализират в зона 7, а в зона 8 се представят текущите стойности. Позиции 9, 10, 11 и 12 са служебни бутони на LabVIEW.

3.6. Изпитване на комбинирана система за измерване на температура, ток, напрежение и околни параметри на въздуха

След цялостното сглобяване и окабеляване на комбинираната система е направена тестова проверка за коректното свързване по схема на отделните захранвани елементи. В настоящата точка се разглежда изпитването на комбинираната система за измерване на температура при 0, 100, 200, 327,46, 700°C, ток при 4,43А и 8,34А, напрежение при 229, 234 и 239V, както и параметри на околната среда като се използва сравнителен метод при оценка точността на отделните модули и се изчисляват грешките им по стандартни методики.

На фиг.3.9 а) е показана принципната схема на опитната постановка, а на фиг.3.9 б) е показана снимка на експерименталната установка за изпитване на модул за температура.



а)



б)

Фиг. 3.9. Изпитване на модула при 200°C и 700°C

а) Принципна схема; б) Експериментална установка

Резултатите от направените експерименти за проверка на модула за температурата, отчетената грешка е в границите $0,04 \div 1,46^\circ\text{C}$ при различни температури. Стойностите на грешките при изпитване на модула за ток и напрежение са: за тока е $0,95 \div 1,69\%$, а за напрежението е в границите $0,20 \div 0,33\%$. Резултатите от направените експерименти за проверка на модула за измерване на параметрите на околната среда са:

температурата на околния въздух е $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, относителна влажност $\pm 1,7\%$ и барометрично налягане $\pm 0,02\%$.

3.7. Заключениелни бележки и изводи

Въз основа на създадената и тествана комбинирана система и от получените резултати и построените диаграми могат да се направят следните изводи:

1. Проектиран и изработен е 16 канален модул за измерване на температура в интервала $0\div 1250^{\circ}\text{C}$. Той дава възможност за получаване на прецизни резултати при провеждане на изследвания и анализ на термични процеси.
2. Модулът за измерване на температурите е тестван чрез сравнителни методи в различни температурни интервали.
3. За бързо и качествено изработване и ремонт на термодвойки е проектирано и изработено приспособление за запояване на двата термоелектрода. Изработените термодвойки са подложени на визуален контрол под микроскоп, от който се установява, че спойката между двата термоелектрода е плътна сфера с нужните размери и без видими шупли и дефекти в нея.
4. Проектиран и изработен е модул за измерване на ток и напрежение с допълнителна платка към ARDUINO UNO. Модулът е тестван в лабораторни условия за проверка точността на измерването, като отчетената грешка е в предписаните от производителя гранични стойности.
5. Проектиран и изработен е модул за измерване параметри на околната среда около моделното тяло (пещ). Използвани са чувствителни елементи за измерване на температура, относителна влажност на въздуха и барометрично налягане, комбинирани в общ код с програма Arduino 1.0.5 и зареден в ARDUINO NANO.
6. Всички изследвани модули за измерване на физични величини удовлетворяват изискваната за създаване на комбинирана система за измерване от гледна точка на надеждност и ефективност. Предлаганите модули за измерване, притежават необходимите метрологични качества за провеждане и планиране на изследвания.
7. Проектирана и изработена е комбинирана система, обединяваща трите модула за измерване на физични величини, осигуряващи общо управление на модулите и интерфейса им в една кутия с общо захранване.
8. С разработения софтуер в програмна среда LabVIEW могат да бъдат вградени интелигентни решения и способност за взимането им така, че той да се адаптира при промяна на измервания сигнал.
9. Създадената система може да се използва както за научна, така и за образователна дейност не само в катедра „Топлотехника“, но и в различни научни и образователни структури, както и за разширяване спектъра на изследванията на математични модели на непрекъснатите тела.

Глава 4: Технологични и ресурсни изследвания на комбинирана система (КС) за измерване на процеси на термообработка

В Глава 4 е направено технологично и ресурсно изпитание на възможностите за измерване на КС в режим на празен ход и в режим на термообработка. Обемната термична обработка е технологичен процес на нагряване, задържане на тялото при подходяща температура и охлаждане. Условието на нагряване и охлаждане са топлофизични процеси, които определят микроструктурата на материала, строежа на кристалната решетка и механични свойства – якост, твърдост, пластичност и др.

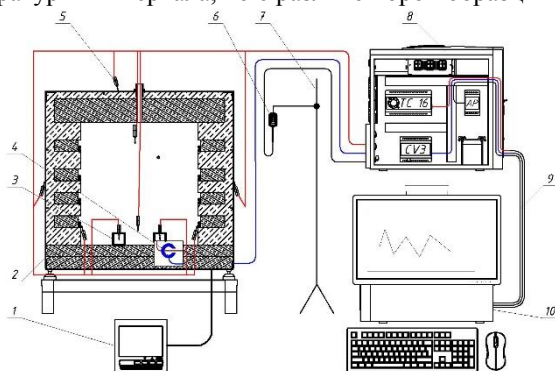
4.1. Методика за експериментално определяне възможностите на комбинирана система за измерване на физични величини

Целта на методиката е технологични и ресурсни изследвания на **комбинирана система** за измерване на физични величини при термообработка в камерни пещи, като се очаква получените резултати да повлияят на по-нататъшното развитие при решаването на конкретни топлофизични задачи и върху изграждане на принципите и основните елементи на различни технологии.

Задачите на методиката са регистриране, изследване и построяване на време – температурни криви, диаграми на параметри на околната среда, силата на тока и съставяне на циклограми при различни режими на термообработка в камерна пещ.

За провеждане на експеримента са изготвени образци от квадратен прокат на средновъглеродна конструкционна качествена стомана Ст45 (С45 по БДС EN ISO 14556) с размери: $a=40\text{mm}$ с дължина $L=120\text{mm}$. Характерно приложение за тези стомани е за изработване на детайли, работещи без ударни натоварвания след закаляване и отвърщане: колянкови и разпределителни валове, зъбни колела и др.

При избора за режим е направен експеримент на празен ход, който е осъществен в камерна пещ в три температурни интервала – 500°C , 700°C , 900°C и в работен режим при същите температурни интервала, но с различен брой образци – 2, 4, 6.



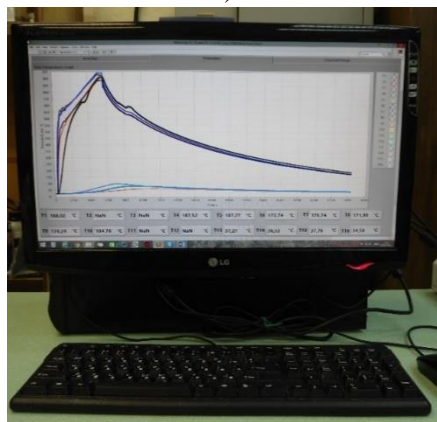
Фиг. 4.1. Структурна схема на експерименталната система

На фиг.4.1 е показана структурната схема на опитната постановка в работен режим, аналогична е схемата за режим на празен ход (без образци 3). Експериментът протича в камерна пещ 2 с електронно управление 1, което се настройва до достигане на желаната температура.

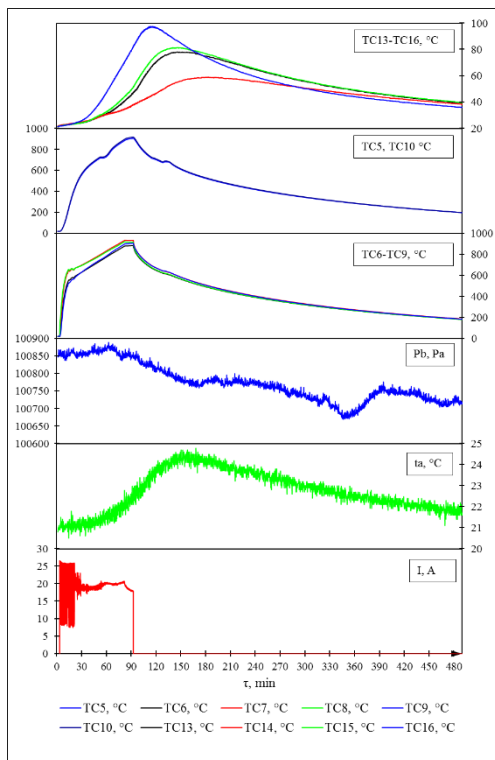
Резултатите от измерванията с комбинираната система са показани на фиг.4.2 а) и б), а на фиг.4.2 в) е представена обща циклограма на резултатите в работен режим при 900°C с два образца. От получените циклограми се прави анализ, дават се оценки и препоръки в съответствие с приетите критерии.



а)



б)



в)

Фиг. 4.2. Резултати от експеримента: а) в работен режим с 2 образца; б) от температурите вътре в пещта; в) обща циклограма

4.2. Експериментално – статистическо изследване на режимите в камерна пещ на празен ход

Тази част от изследванията е извършена в съответствие с набиране на информация за идентификацията в режим на празен ход чрез методите за планиране на експеримента.

Целта на експериментално – статистическото изследване на режимите в камерна пещ на празен ход е да се установят технологичните ѝ възможности като се получи максимална информация от всеки проведен опит, която да послужи за решаване на оптимизационна задача спрямо избрания изходен параметър – скорост на прогряване на пещта $v_{n.n.}$, °C/min в три температурни диапазона.

Матрицата на планирания експеримент е представена в таблица 4.1 заедно с експерименталните данни. За входните фактори (независимите променливи) са избрани сила на тока I , температурна разлика $\Delta t_{n.n.}$ и време на прогряване на пещта $\tau_{n.n.}$.
Таблица 4.1 Матрица на план при празен ход

N	M										Y ₅₀₀	Y ₇₀₀	Y ₉₀₀
	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ .X ₂	X ₁ .X ₃	X ₂ .X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	v _{n.n.} , °C/min		
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	0,172	0,157	0,467
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	0,063	0,201	0,408
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	0,058	0,185	0,435
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	0,165	0,153	0,465
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	0,064	0,192	0,425
6	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	0,224	0,134	0,402
7	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	0,089	0,131	0,407
8	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0,086	0,167	0,441
9	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0,086	0,168	0,442
10	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0,085	0,169	0,443
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,058	0,139	0,398

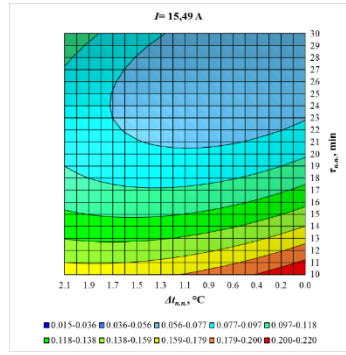
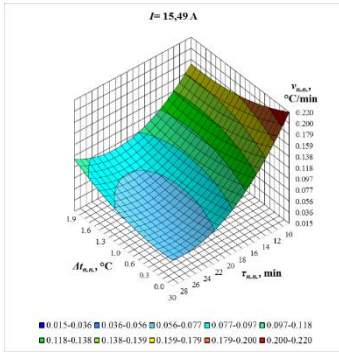
Статистическата обработка на данните от експеримента се извършва на разработена програма в „Microsoft Excel“. Определени са регресионните коефициенти и тяхната значимост и след заместването им се получават регресионните уравнения 4.1, 4.2, 4.3 и съответните изолинии.

$$Y = 0,073 + 0,022 \cdot x_1 - 0,01 \cdot x_2 - 0,043 \cdot x_3 + 0,01 \cdot x_1 \cdot x_2 - 0,011 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,024 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,016 \cdot x_1^2 + 0,015 \cdot x_2^2 + 0,047 \cdot x_3^2; \quad (4.1)$$

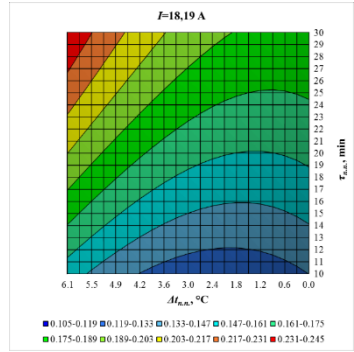
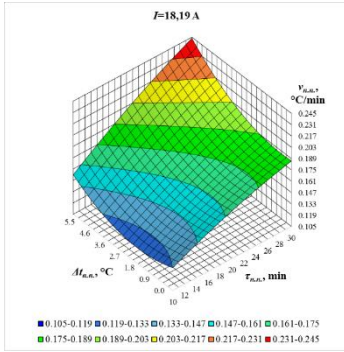
$$Y = 0,141 + 0,005 \cdot x_1 + 0,008 \cdot x_2 + 0,031 \cdot x_3 + 0,012 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,005 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,009 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,02 \cdot x_1^2 + 0,018 \cdot x_2^2 - 0,004 \cdot x_3^2; \quad (4.2)$$

$$Y = 0,409 + 0,02 \cdot x_1 + 0,015 \cdot x_2 + 0,012 \cdot x_3 + 0,033 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,021 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,013 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,007 \cdot x_1^2 + 0,014 \cdot x_2^2 + 0,018 \cdot x_3^2. \quad (4.3)$$

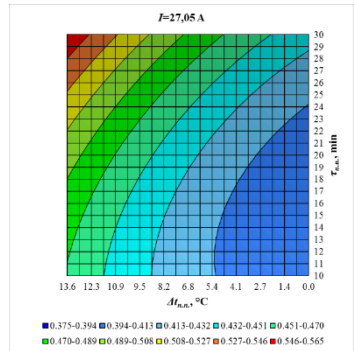
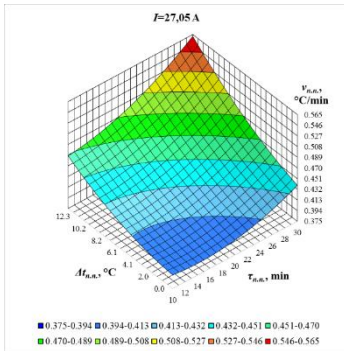
На фиг. 4.3 са представени изолинии за скоростта на прогряване на пещта $v_{n.n.}$, в три температурни диапазона в околността на оптимума при най – характерните комбинации на факторите.



a)



b)



в)

Фиг. 4.3. Зависимости между скоростта на прогряване на пещта $v_{n.n.}$, сила на тока I , температурна разлика $\Delta t_{n.n.}$ и време на прогряване на пещта $\tau_{n.n.}$

а) при 500°C; б) при 700°C; в) при 900°C

В резултат от изследването на взаимовръзката между скорост на прогряване на пещта $v_{n.n.}$, $^\circ\text{C/min}$ в три температурни диапазона с помощта на планиран експеримент и посредством статистическа обработка на данните е получен адекватен математичен

модел във функция от три независими и съвместими фактора чрез намиране на оптималните стойности на факторите за получаване на максимална производителност на процеса и тенденциите за нейното повишаване.

4.3. Експериментално – статистическо изследване на режимите в камерна пещ при термообработка в работен режим

Разгледани бяха няколко варианта за планиране, но тъй като съществуваха ограничения относно възможностите за по – мащабен и продължителен експеримент главно по икономически съображения, приемливо се оказа изпълнението на наситен план за факторен експеримент с три нива на вариране на факторите. Планът, заедно с конкретните данни за изходните параметри е показан на таблица 4.2.

Таблица 4.2 Матрица на план в работен режим

N	M									Y ₅₀₀	Y ₇₀₀	Y ₉₀₀	Y ₂	Y ₄	Y ₆
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ .X ₂	X ₁ .X ₃	X ₂ .X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	t _{n.o.} , °C			v _{n.o.} , °C/min		
1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	500,8	701,2	901,0	0,0115	0,0244	0,0209
2	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	506,0	704,8	913,6	0,0512	0,0762	0,1391
3	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	501,4	696,1	904,0	0,0105	0,0244	0,0426
4	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	503,6	704,8	904,4	0,0507	0,0988	0,0838
5	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	501,2	695,7	903,3	0,0095	0,0201	0,0353
6	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	500,7	700,9	900,7	0,0101	0,0226	0,0182
7	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	503,7	704,8	900,0	0,0020	0,0098	0,0133
8	1	0	0	0	0	0	1	0	0	504,3	705,5	904,8	0,0644	0,1257	0,1557
9	0	1	0	0	0	0	0	1	0	506,7	708,8	906,9	0,0620	0,1237	0,1534
10	0	0	1	0	0	0	0	0	1	503,8	701,0	910,0	0,0354	0,0547	0,1037
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	504,4	705,7	902,8	0,0456	0,0863	0,1146

Данните от таблица 4.2 са обработени с компютърна програма за регресионен анализ при термообработка в камерна пещ, от което бяха получени три регресионни уравнения за температурите на прогряване на образците – t_{n.o.} и три за скоростта – v_{n.o.} при два, четири и шест:

— Регресионно уравнение за t_{n.o.}

$$Y = 504,491 + 0,039. x_1 + 1,94. x_2 + 0,755. x_3 + 0,02. x_1. x_2 + 0,083. x_1. x_3 + 0,467. x_2. x_3 - 0,274. x_1^2 + 0,185. x_2^2 - 1,44. x_3^2; \quad (4.4)$$

$$Y = 705,707 + 0,127 \cdot x_1 + 3,263 \cdot x_2 - 1,185 \cdot x_3 + 0,095 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,195 \cdot x_1 \cdot x_3 - 1,387 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,324 \cdot x_1^2 - 0,158 \cdot x_2^2 - 3,495 \cdot x_3^2; \quad (4.5)$$

$$Y = 903,086 + 1,37 \cdot x_1 + 3,59 \cdot x_2 + 4,319 \cdot x_3 + 1,241 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,298 \cdot x_1 \cdot x_3 + 2,888 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,203 \cdot x_1^2 + 0,127 \cdot x_2^2 + 2,419 \cdot x_3^2; \quad (4.6)$$

— Регресионно уравнение за $v_{n.o.}$

$$Y = 0,044 + 0,012 \cdot x_1 + 0,020 \cdot x_2 + 0,012 \cdot x_3 + 0,012 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0003 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,012 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,009 \cdot x_1^2 - 0,002 \cdot x_2^2 - 0,020 \cdot x_3^2; \quad (4.7)$$

$$Y = 0,087 + 0,023 \cdot x_1 + 0,033 \cdot x_2 + 0,017 \cdot x_3 + 0,023 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,002 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,018 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,015 \cdot x_1^2 + 0,003 \cdot x_2^2 - 0,049 \cdot x_3^2; \quad (4.8)$$

$$Y = 0,117 + 0,020 \cdot x_1 + 0,043 \cdot x_2 + 0,038 \cdot x_3 + 0,019 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,003 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,029 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,017 \cdot x_1^2 - 0,008 \cdot x_2^2 - 0,053 \cdot x_3^2; \quad (4.9)$$

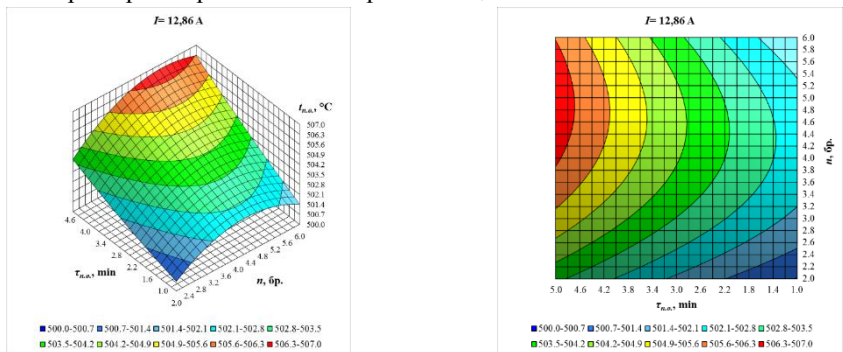
В резултат от изследванията и разработената компютърна програма е направена проверка за възпроизводимост на експеримента в трите температурни диапазона за $t_{n.o.}$ и в три варианта с различен брой образци – $v_{n.o.}$, като с помощта на планирания експеримент и посредством статистическата обработка на данните са получени адекватни математически модели при термообработката.

Чрез компютърна програма за оптимизиране параметрите на модела се търси минимална температура, необходима за прогряване на образците в три температурни диапазона и максимална скорост на прогряване на образците в пешното пространство при термообработка на 2, 4 и 6 образци, ограничено от точките на кодираните променливи с граници $(-1,0; +1,0)$.

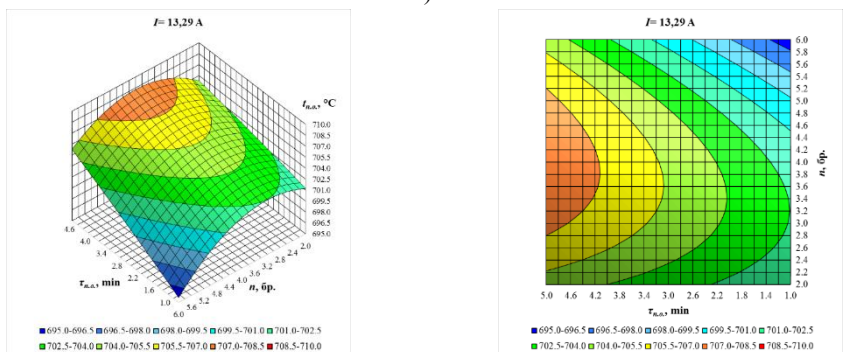
Анализът на абсолютните стойности на коефициентите на регресионните уравнения дава възможност да се определят факторите, които влияят най – силно върху $t_{n.o.}$ и $v_{n.o.}$ при термообработка. Решаващо влияние върху $t_{n.o.}$ оказват силата на тока $I(x_1)$ и времето на прогряване на образците $\tau_{n.o.}(x_2)$ с лек превес на втория фактор, което ясно се вижда от модела, а броят на образците $n(x_3)$ има по – слабо въздействие. Двойните взаимодействия са с почти еднаква тежест. При $v_{n.o.}$ се вижда, че най – голямо влияние върху скоростта оказват силата на тока $I(x_1)$ и температурната разлика $\Delta t_{n.o.}(x_2)$, докато по – слабо е изразено влиянието на третия параметър – времето на прогряване на образците $\tau_{n.o.}(x_3)$.

Зависимостите на температурата на нагряване и скоростта на прогряване на образците от основните фактори описани по – горе при термообработка в камерна пещ също са получени като е използвана компютърна програма за графично представяне на изолинии представени на фиг. 4.4, 4.5.

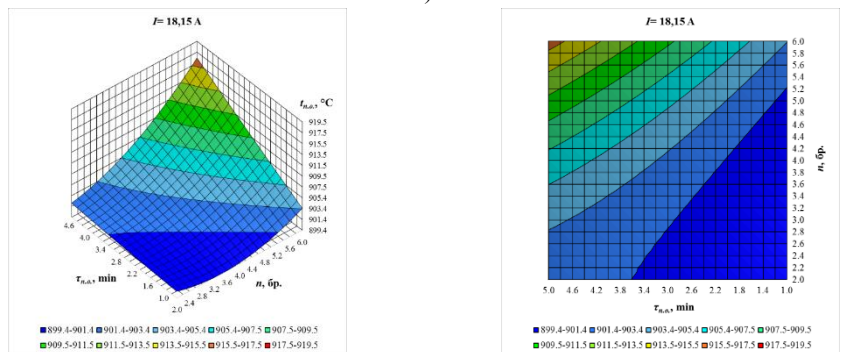
Ако се анализират графичните зависимости, може да се добие представа за областите, в които $t_{n.o.}$, приема минимални стойности, а $\tau_{n.o.}$, приема максимални стойности при термообработки в камерната пещ.



a)

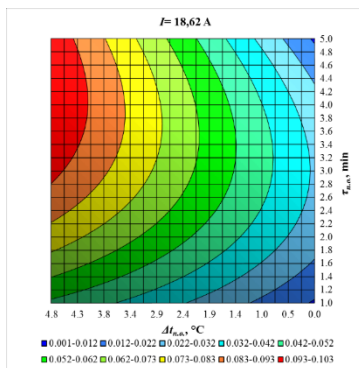
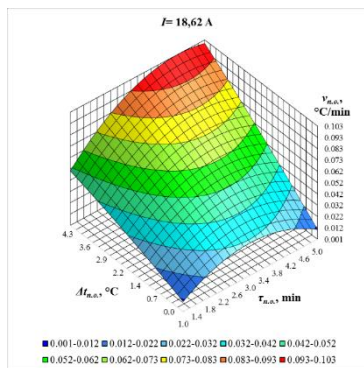


б)

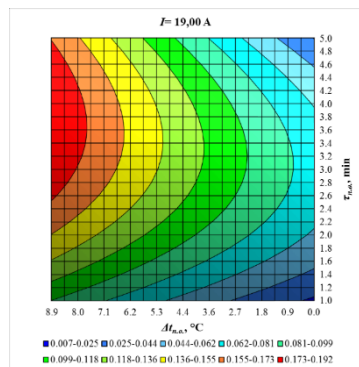
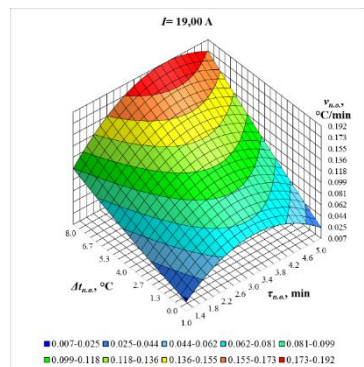


в)

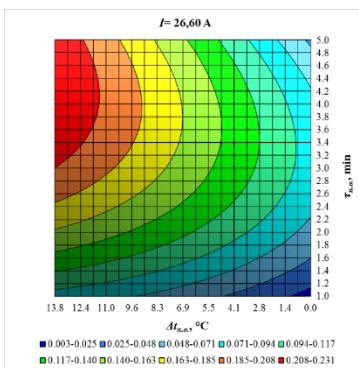
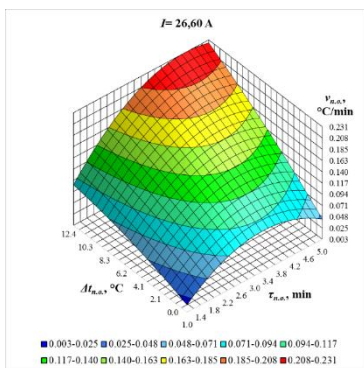
Фиг. 4.4. Зависимости между температурата на прогряване на образците $t_{n.o.}$ и сила на тока I , времето за прогряване на образците $\tau_{n.o.}$ и броя на образците n
 а) при 500°C; б) при 700°C; в) при 900°C



a)



b)



в)

Фиг. 4.5. Зависимости между скоростта на прогряване на образците $v_{n.o.}$ и сила на тока I , температурна разлика за прогряване на образците $\Delta t_{n.o.}$ и времето за прогряване на образците $\tau_{n.o.}$

а) при 2 образеца; б) при 4 образеца; в) при 6 образци

4.4. Изследване оценка на ефективността на пещното пространство при термообработка

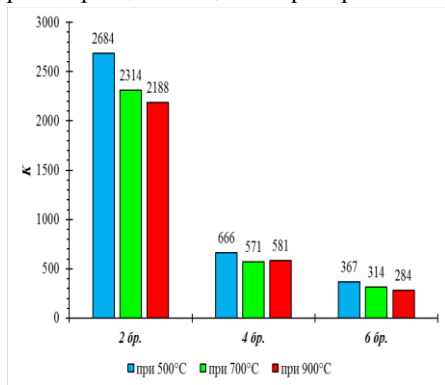
За да се изследва ефективността на пещното пространство при термообработка с получените оптимални стойности на режимните параметри са проведени допълнителни изчисления. Използва се същият обект на изследване в трите температурни диапазона и същият брой опитни образци. Резултатите от проведените експерименти се използват за реализиране на настоящите изчисления, като се анализират получените резултати. За изследване ефективността на пещното пространство при термообработка се използва коефициент K , който е безразмерен и е представен в уравнение 4.10.

$$K = \frac{Q \cdot \tau_n \cdot V_n}{m \cdot C_p \cdot \Delta t \cdot V_o} \quad (4.10)$$

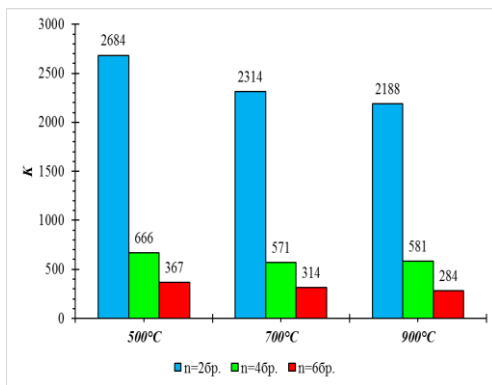
Таблица 4.3 Стойности за K при различни режими на термообработка

$t, ^\circ\text{C}$	$n=2$ бр.	$n=4$ бр.	$n=6$ бр.
500	2684	666	367
700	2314	571	314
900	2188	581	284

След направените изчисления за определяне ефективността на пещното пространство K се получава минимална стойност на този безразмерен коефициент. Резултатите са показани в таблица 4.3, а на фиг.4.6 а) е представено отношението на K спрямо запълването на пещното пространство при три температурни диапазона. Фиг.4.6 б) показва графично резултатите на K при 500°C, 700°C и 900°C с различен брой образци в пещното пространство.



а)



б)

Фиг. 4.6. Диаграма на зависимостта на K
а) от броя на образците; б) от температурата

4.5. Обобщения и изводи

1. Направени са технологични и ресурсни изследвания на комбинирана система за измерване на физични величини в режим на празен ход в три температурни интервала при 500°C, 700°C и 900°C.
2. Направени са технологични и ресурсни изследвания на комбинирана система за измерване на физични величини при термообработка в камерна пещ, с 2, 4 и 6 образци при три температурни диапазона.
3. Експериментално са снети данни в режим на празен ход и са съставени общи циклограми за температурата, параметри на околната среда и изменение на тока в три температурни интервала при 500°C, 700°C и 900°C.
4. Експериментално са определени данни в работен режим при обемна термообработка в три температурни интервала 500°C, 700°C и 900°C и са съставени общи циклограми за температурата, параметри на околната среда и изменение на тока с различно запълване на пещта.
5. Резултатите, представени на общите циклограми дават ясна картина при изменение на тока за неговото влияние върху температурата, която се развива в пещното пространство.
6. На база проведеното планирано експериментално – статистическо изследване за взаимовръзката между технологичните параметри на процеса на нагриване на камерна пещ на празен ход е получен адекватен и оптимизиран регресионен модел за скоростта на прогряване на пещта в три температурни диапазона. Установено е влиянието на основните фактори по степен на значимост, като най – важни за повишаване на $v_{n.n.}$, респективно производителността на процеса са силата на тока I и времето на прогряване на пещта $\tau_{n.n.}$.
7. Създаден е математичен модел и е направено математическо описание на процеса на обемна термообработка в работен режим за различен брой образци, като е определена взаимовръзката между технологичните параметри на процеса на нагриване в камерна пещ и са получени адекватни и оптимизирани регресионни модели за температурата и скоростта на прогряване на образците. Определено е влиянието им, като най – важни за понижаване на $t_{n.o.}$ се оказват силата на тока I и времето за прогряване на образците $\tau_{n.o.}$. При $v_{n.o.}$ се вижда, че най – голямо влияние върху скоростта оказват силата на тока I и температурната разлика $\Delta t_{n.o.}$.
8. При изследване оценка на ефективността на пещното пространство K в три температурни диапазона при обемна термообработка и различно запълване се получава, че пещта е най – ефективна ($K=284$) в работен режим, респективно температура на нагриване 900°C и 6 броя детайли в нея. На базата на направеното изследване относно ефективността се установява, че режимните параметри на камерната пещ са избрани правилно.

Глава 5: Компютърно симулационно моделиране на камерна пещ и термична обработка в нея

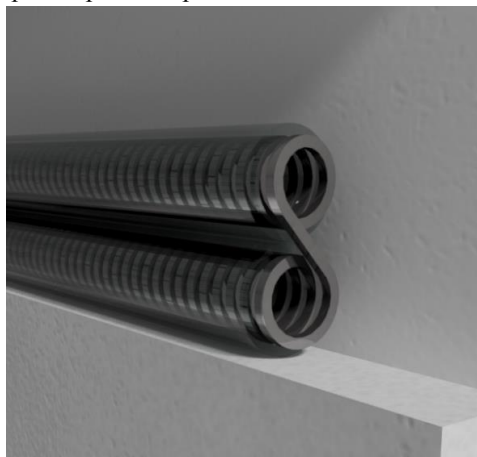
Симулирането на термичните режими в камерната пещ е извършено със софтуерен продукт за флуиден и термичен анализ „Autodesk CFD“, който е подходящ за целите на изследването. В него са заложили два типа модели като първият модел включва камерна пещ в режим на празен ход, а вторият в работен режим с пробни образци в пещното пространство. Използван е изчислителен комплекс на математичния модел на нелинейна нестационарна права задача на топлопроводността в непрекъсната среда. Целта на компютърно симулационния модел е адекватно да пресъздадат резултатите от експериментите получени от КС за измерване на физични величини като се определи с точност до 5% разпределението на температурата в реалните обекти заложили в моделите и активната зона на нагриване в пещното пространство.

5.1. Геометрия на изследваните обекти и задаване на материали с физични условия

Обектът на изследване и моделиране е проектиран и изграден дигитално във виртуална среда с помощта на софтуерен продукт за триизмерно – декартова визуализация „Autodesk Inventor Professional“ – фиг.5.1, след което е изследван в друга среда за флуиден и термичен анализ „Autodesk CFD“. В същността си всеки елемент е изграден в пространството с базисна координатна система, като се обособяват едни и същи елементи, съставлящи изследвания обект с неговите 2 вариации. Първата сглобка е камерна пещ в режим на празен ход, а втората в работен режим.



а)



б)

Фиг. 5.1. Компютърно симулационен модел

а) Камерна пещ с 2 образца; б) Нагревателен елемент с квадратно сечение в кварцови тръби;

Всяка една от двете сглобки се състои от 47 елементи, като в това число е и въздухът в пещта и около нея, но в работен режим те се увеличават спрямо броя образци в пещното пространство с 2, 4 и 6 елементи. Направена е идеализация на някои от елементите с цел опростяване на геометричния обект. Такива се явяват нагревателите на пещта, като вместо спирала с кръгло сечение от електросъпротивителен проводник, те са представени като спирала с квадратно сечение.

След направеното литературно проучване на материалите, от които е изградена камерната пещ относно топлофизичните им характеристики са съставени зависимости спрямо температурата: $k = k(t)$, $\rho = \rho(t)$, $Cp = Cp(t)$ и др., като е изградена нова библиотека в софтуерния продукт „Autodesk CFD“. За материали, за които няма сведения в литературата относно топлофизичните характеристики, са приети техни константни стойности при нормални условия.

5.2. Компютърно симулиране на камерна пещ за термична обработка в режим на празен ход

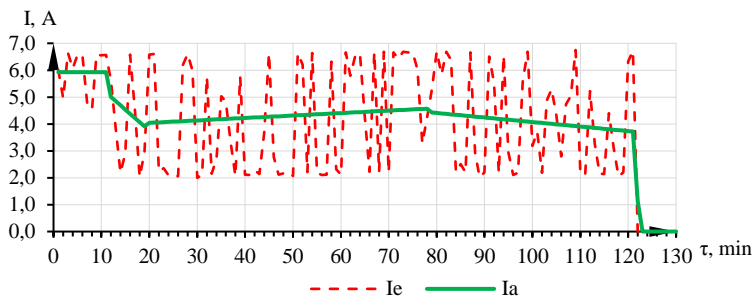
За нуждите на дисертационния труд е разработен компютърно симулационен модел на камерна пещ за термична обработка в режим на празен ход. Моделът трябва адекватно да пресъздава реалният обект на изследване, материалите и средата, в която се намира. Периодът, за който протича експеримента е $\approx 8h$ и данните се регистрират през 1s, което би забавило изчислителния комплекс на анализа. За това се налага получените данни да се обработят и зададат в модела през по – голям интервал от време 60s (за една итерация) или за изследвания интервал това са 480 времеви стъпки, който да гарантира минимална грешка на направените анализи спрямо получените резултати от експериментите.

5.2.1. Задаване на гранични условия (ГУ) на повърхнините в режим на празен ход

Задава се гранично условие от I род на нагревателите съгласно измерената сила на тока от експеримента, като получените резултати се обработват в програмен продукт „Microsoft Excel“. Получените резултати при температура от 900°C и използваните зависимости от уравнение (5.1) са представени на фиг.5.2.

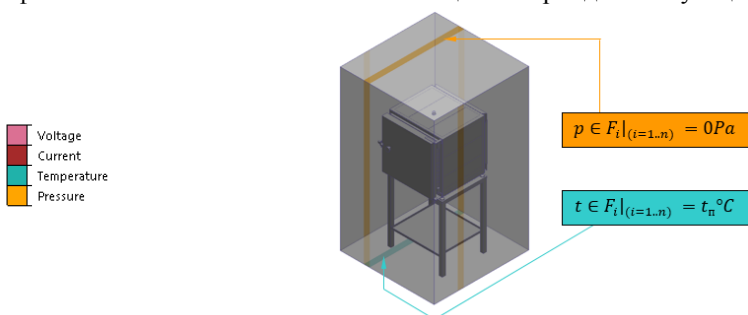
$$I_a = \frac{\sqrt{\bar{I}_e^2 + \bar{I}_e}}{2.m}, \quad (5.1)$$

С помощта на тази зависимост се определя силата на тока, която се задава в анализа (I_a), спрямо измерената от експеримента средна стойност на тока (\bar{I}_e), която се прави за период от 60s. С m са обозначени паралелно свързаните групи на нагревателите за еднофазно захранване.



Фиг.5.2. Графично представяне на ГУ за силата на тока зададен във времето

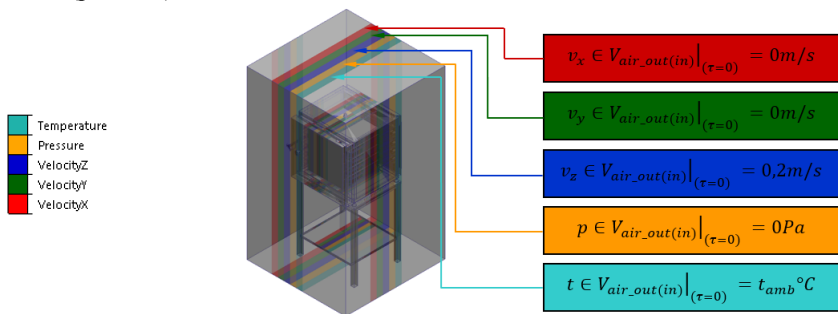
Задава се гранично условие от I род с температурата на пода ($t_{п}$), която се явява началната температура на околния въздух в началото на измерването с КС, показани на фиг.5.3 със синкаво – зелена лента за целия период на симулацията.



Фиг. 5.3. Повършини със зададени ГУ за температура и налягане на околния въздух

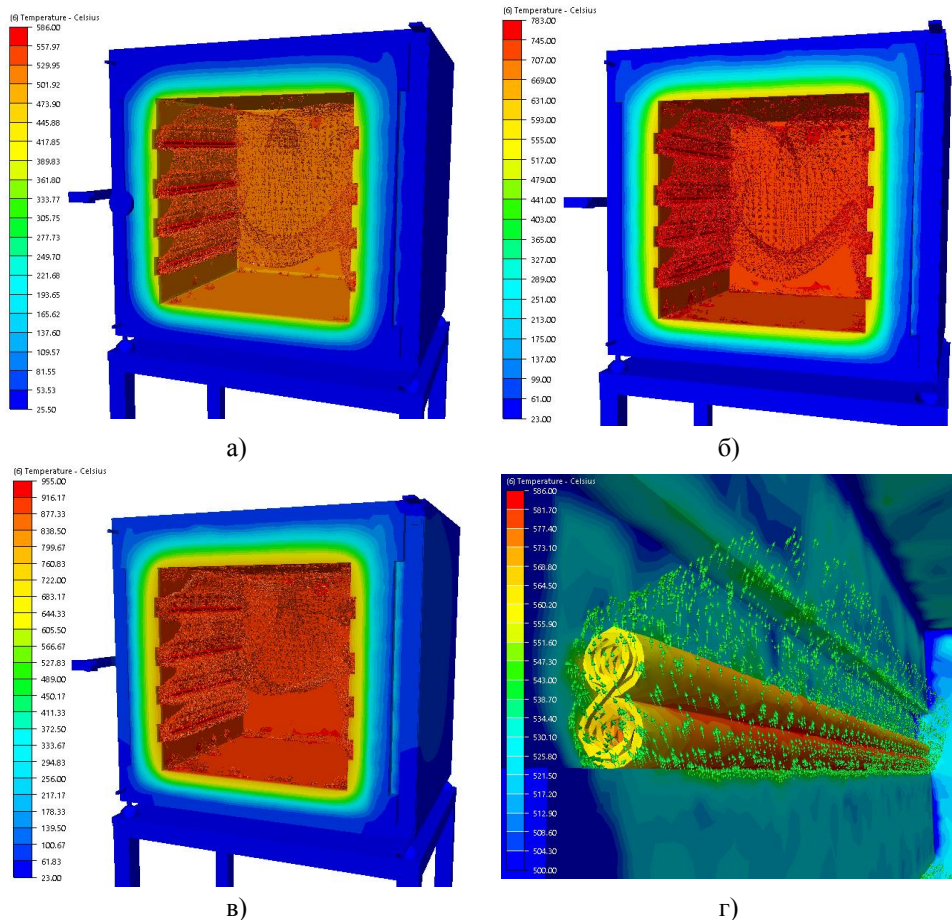
5.2.2. Задаване на начални условия (НУ) върху обеми в режим на празен ход

При задаването на НУ – фиг.5.4 се приемат стойностите в началото на измерването с КС и се посочват обемите вътре (V_{air_in}) и отвън (V_{air_out}) на съответното тяло в модела (режима) със съответната стойност.



Фиг. 5.4. Обеми със зададени НУ на въздуха вътре и отвън на пещта

5.2.3. Решение на задачата на камерна пещ в режим на празен ход



Фиг. 5.5. Температурни полета и векторни полета на токовете линии на въздуха
а) 500°C; б) 700°C; в) 900°C; г) разпределение на температурата в нагревателна двойка при режи от 500°C

На фиг.5.5 се вижда, че се образува активна зона от постоянна температура на **140mm** от пода, в която би следвало да се разполагат детайли за нагряване при термообработка в интервала 500÷900°C. От симулациите показани на фиг.5.5 а), б) и в) се вижда равномерно прогряване на вътрешните повърхнини и получените активни зони или „температурни облаци“ в пещното пространство, като стойностите могат да се отчетат на цветната лента на всяка от фигурите. Последната фиг.5.5 г) представя температурата на нагревателя, разположен в горната лява част при режим от 500°C. Вижда се решението на неравномерното температурно поле по дължина на

нагревателната двойка, вследствие на протичащия ток и движението на въздуха около него вследствие на конвекция.

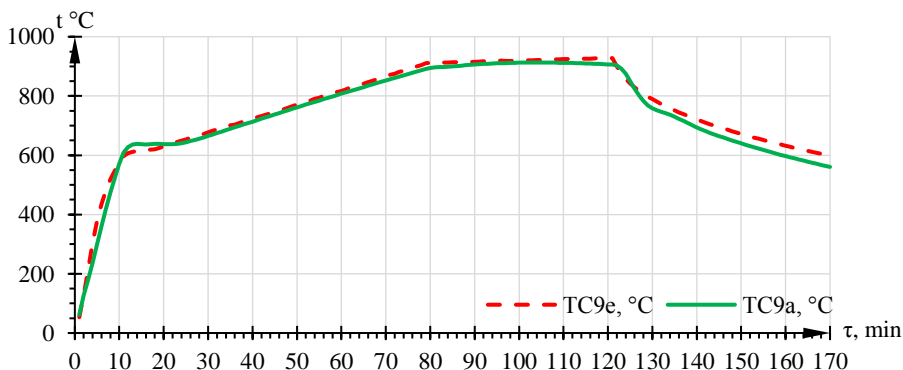
5.2.4. Отчитане на относителната грешка на температурата в пещното пространство от експеримента и модела в режим на празен ход

В модела са заложили в декартови координати положенията на термодвойките TC6÷TC9, участващи в експеримента, така че да се запази коректността на отчитането. Всяка отчетена стойност от поставените сензори в модела е за една итерация, като броят на отчетените измервания отговаря на стъпките в дадения режим, което е достатъчно за отчитане на относителната грешка (\bar{x}_i) на модела спрямо реалния експеримент.

Общата грешка за целия модел (\bar{x}_a) се изчислява като средна стойност за участващите измервателни точки в пещното пространство, на база получената (\bar{x}), от която са получени следните резултати за трите режима на работа показани в табл.5.1. Таблица 5.1 Резултати от грешката на модела спрямо експериментите

Режим	$(\bar{x}), \%$				$(\bar{x}_a), \%$
	TC6	TC7	TC8	TC9	
500°C	4,17	6,73	6,95	3,23	5,27
700°C	5,27	3,05	4,03	2,03	3,60
900°C	2,38	1,42	3,53	2,89	2,56

Получените резултати за 900°C са представени графично на фиг.5.6, като времемпературни криви на термодвойка TC9 за празен ход, доказващи адекватността на модела.

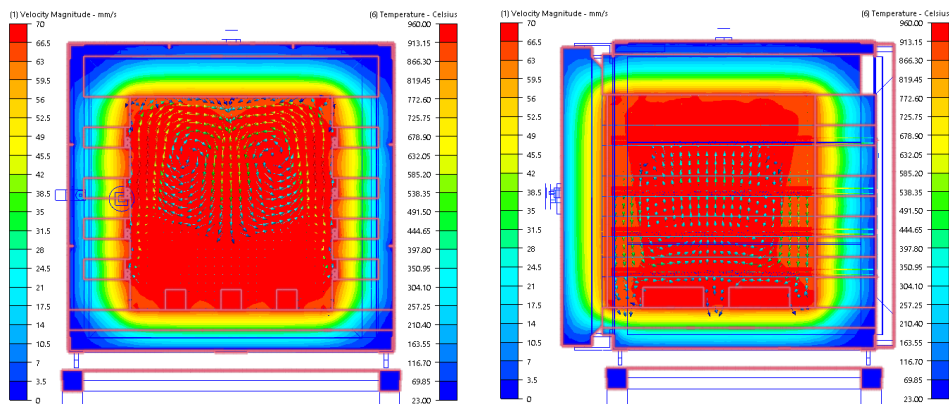


Фиг. 5.6. Времемпературни криви на температурата при 900°C в пещното пространство от експеримента и анализа в режим на празен ход

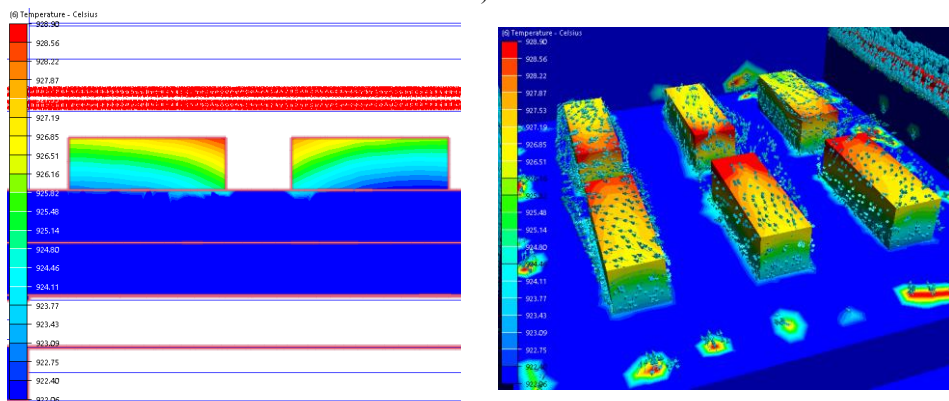
5.3. Компютърно симулиране на камерна пещ за термична обработка в работен режим

В тази точка са разгледани задачите в работен режим за термична обработка при 900°C, но с различно натоварване вътре в пещното пространство с 2, 4 и 6 образци. Използвани са похватите от т.5.2 на настоящата глава за подготовка, решение на моделите и получаване на адекватни резултати от анализите.

5.3.1. Решение на задачата на камерна пещ в работен режим



а)



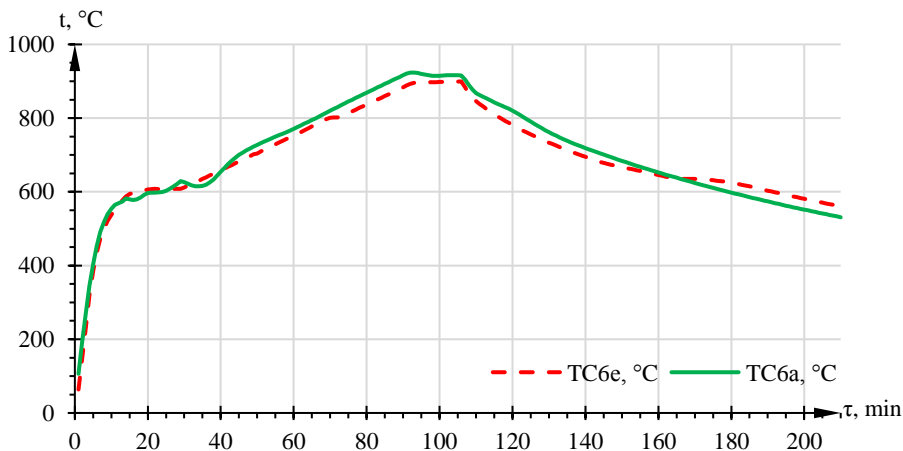
б)

Фиг. 5.7. Температурни полета и токови линии при 6 образци
а) на камерната пещ; б) вътре в пещта

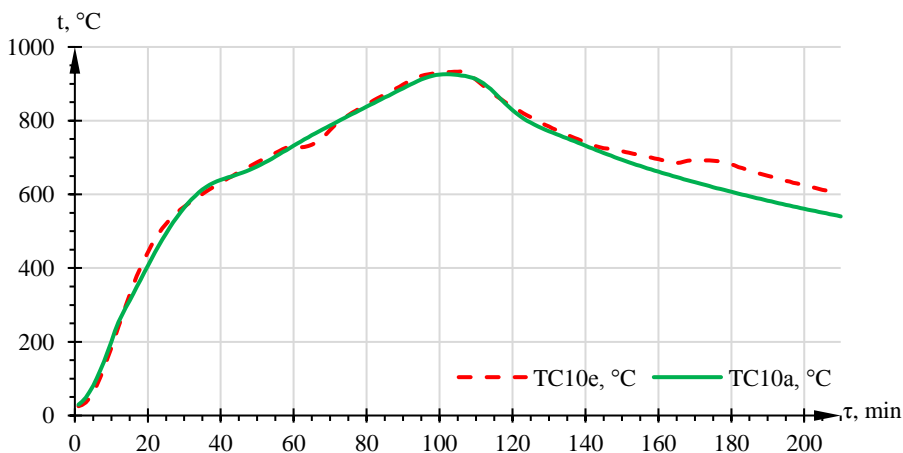
На фиг.5.7 са представени резултатите на пещното пространство с детайли, получени за 100 min при режим с 6 образци, при които се наблюдава същият температурен облак. Представя се движението на въздуха и температурното разпределение както в пещта, така и около образците със съответната легенда.

5.3.2. Отчитане на относителната грешка на температурата в пещното пространство и образците от експеримента и модела в работен режим

Относителната грешка се пресмята аналогично като стъпки от т.5.2.4 с разликата, че при всеки работен режим се увеличават сензорите в пещта. Резултатите при трите режима на работа са представени в табл.5.2 и графично за 6 образци на фиг.5.8 а) и б).



а)



б)

Фиг. 5.13. Времетемпературни криви на температурата от експеримента и анализа в работен режим при 900°C с 6 образци

а) от TC6 в пещното пространство; б) от TC10 в образец

Таблица 5.2 Резултати от грешката на модела спрямо експериментите

Реж.	$(\bar{x}), \%$										$(\bar{x}_a), \%$
	TC6	TC7	TC8	TC9	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC10	
2обр	2,84	3,87	4,24	5,56	-	-	-	-	4,20	4,31	4,17
4обр	3,09	4,33	3,85	4,99	4,20	-	-	4,43	4,16	3,97	4,13
6обр	3,59	4,61	4,67	5,08	4,48	4,17	5,11	4,43	4,49	4,74	4,54

5.4. Обобщения и изводи

1. Продължителността на нагряване оказва влияние върху производителността на процеса на термообработка, поради което времето за нагряване трябва да бъде минимално от икономическа гледна точка.
2. Изследванията за възникващото температурно поле в материала при термообработка на детайли с различно запълване в камерната пещ са осъществени чрез набор от съвременни стандартни и създадени специално за целите на настоящото изследване физични модели за числени симулации.
3. Обобщавайки резултатите от зададените параметри с помощта на разработените компютърно – симулационни модели на камерна пещ на празен ход и при процеси на термообработка на детайли с различен брой се оказва, че може да се посочи с достатъчна точност разпределението на температурата в реалните обекти.
4. От направените симулации и представените фигури ясно се виждат активните зони при различни термични режими и различно запълване на пещното пространство. Тези решения могат да се използват за правилното разположение на серия детайли или детайли със сложна форма при термообработка в камерна пещ.
5. От температурните полета и вектори на токовите линии при посочените процеси на термообработка на детайли в камерни пещи се разкрива перспективи за технологично управление с цел равномерно прогряване на детайлите и подобряване повърхностните свойства на металите.
6. Въз основа на съпоставянето на теоретичното и експериментално изследване при термообработка на детайли в камерни пещи, може да се направи извод, че симулационните изследвания чрез математичния модел адекватно пресъздават процесите на разпределение на топлинното поле в дълбочина на реалния обект.
7. Въз основа на проведените симулационни изследвания на процеса на термообработка на детайлите в камерни пещи с помощта на програмен продукт „Autodesk CFD“ е получено квазистационарно разпространение на температурното поле в зоната на нагряване и охлаждане.
8. Сравняването на експерименталните и изчислените температури показва, че несъвпадението в участъка на термичния цикъл при всички разработени симулации е 3÷5% за различните участъци на интервала.

Глава 6: Основни изводи и предложения за практиката

6.1. Предложения за практиката

Дисертационният труд е насочен към идентификация на термични режими на пещи камерен тип за термична обработка. Направените изследвания по отношение на измерване и оптимизиране на технологичните параметри и оценка ефективността на пещното пространство след процес на термообработка, дават основание да се смята, че:

1. Разработената комбинирана система за измерване на физични величини е работоспособна, с висока надеждност и точност на отчетените резултати.
2. Разработената комбинирана система за измерване на физични величини може да послужи при измерване и анализ на други технологични задачи, свързани с нагряването и охлаждането.
3. Получените циклограми могат да станат основа за решаването на конкретни топлофизични задачи, свързани с изменение на температурата в зоната на обработка или на целия обем на изделието, както и за направата на компютърно – симулационни модели.
4. От получените симулации се вижда къде се извършва равномерно прогряване на вътрешните повърхнини и получаването на активни зони или „температурни облаци“ в пещното пространство, които могат да се използват за правилното пространствено разположение на различен брой и форма детайли в пещи от камерен тип.

6.2. Приноси по дисертационния труд

Настоящият дисертационен труд представлява завършен етап от теоретично – експериментално изследване при идентификация на термични режими на пещи камерен тип за термична обработка. Като основа за реализацията на целта и задачите на дисертационната работа и получените резултати могат да бъдат формулирани следните основни приноси:

6.2.1. Научно – приложни приноси

1. Предложен е обобщен математичен модел на нелинейна нестационарна права задача на топлопроводимостта в непрекъснати среди. Той включва параболичното уравнение на топлопроводимостта и условията за еднозначност, в това число гранични и начални условия, обезпечаващи съществуването и единствеността на решаването на задачата.
2. Предложена е методика за идентификация на термичните режими в камерна пещ. Благодарение на идентификацията се получава необходимата информация за анализ и синтез на процеси на термообработка.

3. Предложена е методика за изпитване на комбинираната система за измерване на температура, ток, напрежение и параметри на околната среда, като се използва сравнителен метод при оценка точността на отделните модули и се изчисляват грешките им.
4. Предложена е методика за бързо и качествено изработване и ремонт на термодвойки, като е проектирано и изработено приспособление за запояване на двата термоелектрода.
5. Разработена е експериментална методика за измерване на физични величини, като са снети данни в режим на празен ход и са съставени общи циклограми за характера на температурата, параметри на околната среда и изменение на тока в три температурни интервала при 500°C, 700°C и 900°C.
6. Разработена е експериментална методика, за измерване на физични величини, като са снети данни в работен режим при обемна термообработка в три температурни интервала 500°C, 700°C и 900°C и са съставени общи циклограми за характера на температурата, параметри на околната среда и изменение на тока с различно запълване на пещта.
7. Предложен е компютърно – симулационен модел и е изследвано разпределението на температурното поле и активната зона на пещи за термообработка от камерен тип при режим на празен ход в три температурни интервала 500°C, 700°C и 900°C. Резултатите от симулациите са сравнявани с данни и зависимости, получени в работата от експеримента. Установено е, че разработеният модел адекватно пресъздава процесите на разпределение на температурното поле в пещното пространство.
8. Предложен е компютърно – симулационен модел и е изследвано разпределението на температурното поле и активната зона на пещи за термообработка от камерен тип в работен режим при температура 900°C на нагриване и охлаждане с два, четири и шест образци в пещта. Резултатите от симулациите са сравнени с данни и зависимости, получени в работата от експеримента. Установено е, че разработеният модел, адекватно пресъздава процесите на разпределение на температурното поле на повърхността и в дълбочина на реалния образец.

6.2.2. Приложни приноси

1. Разработена и създадена е електронна апаратура за измерване на високи стойности на температура, сила на тока, напрежение и параметри на заобикалящата обекта среда и компютърна система за обработка и анализ на получените резултати от измерването.
2. Разработен е прототип на комбинираната система в 3D модел към катедра „Топлотехника“ в Технически университет – Варна, като при изработката са

използвани стандартни, доказали се в практиката елементи, устройства, преобразователи и програмни продукти.

3. Разработен е софтуер за запис и обработка на експерименталните данни от комбинираната система, като е използван специализиран продукт LabVIEW на National Instruments.
4. Разработена е програма за експериментално – статистическо изследване при планиране на експеримент с програмен продукт „Microsoft Excel“ в съответствие с известни формули от математическата статистика. Определени са регресионните коефициенти и тяхната значимост и след заместването им в уравнението на регресия се изчертават съответните изолинии в програмата.
5. Демонстрираният метод за 3D моделиране на обектите и процесите в пещи за термообработка от камерен тип на образци от стомана има универсален характер. Той дава възможност за експериментиране на различни термични режими и различна геометрия на обекти, като се варира с граничните и начални условия в моделите.
6. На база компютърно – симулационния модел за обемна термообработка в камерна пещ са определени активните температурни зони, които могат да се използват за прогнозиране разположението на обекти. Това би довело до подобряване качеството на слоя чрез повишена твърдост и износоустойчивост.

6.2.3. Методически приноси

1. Предложена е методика за изследване на взаимовръзката между технологичните параметри на процеса на нагриване на камерна пещ на празен ход, като е получен адекватен и оптимизиран регресионен модел за скоростта на прогряване на пещта в три температурни диапазона.
2. Направено е математическо описание на процеса на обемна термообработка в работен режим за различен брой образци, като е определена взаимовръзката между технологичните параметри на процеса на нагриване в камерна пещ и са получени адекватни и оптимизирани регресионни модели за температурата и скоростта на прогряване на образците.
3. Разработена е математическа зависимост за оценка ефективността на пещното пространство „K“ в три температурни диапазона при обемна термообработка и различно запълване.
4. При използване на числени модели за решаване задачи на топлопроводността, използването на смесени гранични условия (гранично условие от 3-ти род) внася големи неточности в решението, т.к. прилагането на стойности на коефициента на конвективен топлообмен α е некоректно, предвид липсата на точни стойности за него. В обобщения модел на дисертационния труд са използвани само гранични

условия на Дирихле и Нойман, получени директно от измерване в реални условия.

5. За коректно и точно измерване с модул за отчитане на температурата от термоелектрическите пирометри и прилежащия софтуер към него е направена промяна в сорс кода на библиотеката на цифров преобразувател за усилване на е.д.н. – МАХ31855. Промяната отчита по – точна линеаризация на преобразуване на напрежението в температура и намаляване на грешката от измерване, представено чрез рационална полиномна функция.

6.3. Публикации по дисертационния труд

[П.1] Хаджидимов И. Ив., **Йорданов К. Кр.**, 16 канален АЦП с виртуално повишаване на разрядността., Втора научна конференция с международно участие „Компютърни науки и технологии“, №2, 26-27 септември, 2014 г., Варна, ISSN 1312-3335, 13-18 с.

[П.2] **Йорданов К.**, Хаджидимов И., Експериментално-статистическо изследване на взаимовръзката между технологичните параметри при процеса на преддеформационно нагряване на образци в камерна пещ, Научни трудове - Русенски университет „Ангел Кънчев“ – 2015 – Топлотехника, хидро- и пневмотехника, ISSN 1311-3321, 81-86 с.

[П.3] **Йорданов К.**, Компютърно симулиране на термичен режим за определяне на топлинните процеси при преддеформационно нагряване на образци в камерна пещ, ННТД по ТММ, Топлотехника-11, година 7, книга 1, 2016, ТУ-Варна, ISSN 1314-2550, 41-45 с.

[П.4] **Йорданов К.**, Хаджидимов И., Илчев И., Димитров Д., Идентификация на параметрите в процеса на преддеформационно нагряване на образци в камерна пещ, ННТД по ТММ, Топлотехника-11, година 7, книга 1, 2016, ТУ-Варна, ISSN 1314-2550, 46-50 с.

[П.5] **Krastin Yordanov**, Piya Hadzhidimov, Developing a combined system for measurement of temperature, current, voltage and ambient parameters of air, 5TH International conference on thermal equipment, renewable energy and rural development TE-RE-RD 2016, ISSN 2359-7941, 153-158 с.

[П.6] **Йорданов К.**, Изчисляване на камерна електросъпротивителна пещ за спичане на праховометалургични материали, Научни трудове - Русенски университет „Ангел Кънчев“ – 2016 – Топлотехника, хидро- и пневмотехника, ISSN 1311-3321, 49-54 с.

[П.7] **Йорданов К.**, Експериментално изследване на режимите в камерна пещ на празен ход с комбинирана система за измерване, “Машиностроителна техника и технологии”, НТС, ТУ-Варна, бр. 1, 2016г., ISSN 1312-0859, 75-78 с.

Abstract

PhD Thesis Title: Identification of the thermal modes furnace chamber type for the heat treatment

Of the requirements for the Degree Doctor of Philosophy

By: Yordanov Krastin Krasimirov

In the thesis is examined and analyze the identification of the thermal modes of heat treatment furnaces of the chamber type, such as be submitted to a system for measuring and mathematically simulate of the results of the experiment. The analysis in the chapter 1 was concentrated in the peculiarities of the identification at an electric resistance chamber heat treatment furnaces. The methods for conducting scientific studies are presented in Chapter 2, where it separated into a mathematical model of a nonlinear nonstationary rights task of thermal conductivity and methodic for the identification of the thermal modes in chamber furnace. In Chapter 3 clearly explained designing and constructing of a combined system for measuring physical quantities. Technologically and resource testing capabilities for measuring the combined system was made in the Chapter 4 at the idle mode and thermal processing. Available in Chapter 5 is computer simulation modeling of the chamber furnace and heat treatment in her, and solves a nonlinear nonstationary rights task at the two modes.

Резюме по диссертации

Тема: Идентификация тепловых режимов камеры печи типа термической обработки
Для присуждения образовательной и научной степени „доктор“

Аспирант: инж. Йорданов Кръстин Красимиров

Определение тепловых режимов печей для термообработки типа камеры
В диссертации изучать и анализировать идентификацию тепловых режимов термообработки печей камерного типа, например, представлена система для измерения и математически моделировать результаты эксперимента. Анализ в главе 1 сосредоточен в особенностях идентификации, когда электрическое сопротивление камерные печи для термообработки. Способы проведение исследований представлены даже в главе 2, где она разделена на математическую модель нелинейного присвоения нестационарных прав теплопроводности и методов идентификации тепловых режимов в камере печи. В главе 3 четко разъяснены проектирование и строительство комбинированной системы для измерения физических величин. Технологическая и тестирование ресурсов возможность для измерения комбинированной системы производится в главе 4 в режиме ожидания и в режиме нагрева. Доступный в главе 5, компьютерное моделирование камеры печи и термообработка в ней, а решили нелинейный нестационарный объект правы в двух режимах.