

**UNIVERSITATEA POLITEHNICĂ TIMIȘOARA**

**FACULTATEA DE ELECTROTEHNICĂ**

617. 841  
285 14

**Ing. HOREA FALOTĂ**

## TEZĂ DE DOCTORAT

**CERCETĂRI PRIVIND SIMULAREA ȘI OPTIMIZAREA UNOR  
PROCESE TERMICE ÎN CUPTOARE ELECTRICE INDUSTRIALE  
CU REZISTOARE ȘI ÎNALTĂ TEMPERATURĂ**

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

*CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC*

**Prof.Dr.Ing. IOAN ȘORA**

- 1996 -



# CUPRINS

## CUVÂNT ÎNAINTE

INTRODUCERE . . . . .	1
-----------------------	---

A. Necesități și oportunități . . . . .	1
B. Scopul și obiectivele lucrării . . . . .	4

CAP.I STADIUL ACTUAL PRIVIND PERFORMANȚELE CONSTRUCTIV FUNȚIONALE ALE CUPTOARELOR ELECTRICE CU REZISTOARE . . .	7
--	---

I.1 Importanța tehnologică a cuptoarelor electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare . . . . .	7
I.2 Situația actuală în construcția și exploatarea cuptoarelor electrice . . . . .	8
I.2.1 Criterii de evaluare a performanțelor . . . . .	8
I.2.2 Caracteristicile termoenergetice ale cuptoarelor concepute și executate în țară . . . . .	10
I.3 Soluții moderne de îmbunătățire a performanțelor constructiv-funcționale a cuptoarelor electrice . . . . .	14
I.3.1 Soluții constructive vizând performanțele energetice . . . . .	14
I.3.2 Soluții privind îmbunătățirea performanțelor funcționale . . . . .	15
I.3.3 Soluții privind informatizarea proceselor tehnologice . . . . .	19
I.4 Criterii de optimizare constructiv-funcțională . . . . .	20

CAP.II FUNDAMENTAREA TEORETICĂ A LUCRĂRII . . . . .	22
---	----

II.1 Fenomene termofizice și termochimice în cuptoare electrice industriale . . . . .	22
II.1.1 Fenomene termofizice . . . . .	22
II.1.2 Fenomene termochimice . . . . .	23
II.2 Mecanismele transferului termic și de masă în cuptoare electrice . . . . .	24
II.2.1 Ecuația de bilanț energetic . . . . .	24
II.2.2 Discretizarea ecuației căldurii . . . . .	24
II.2.2.1 Transferul termic conductiv . . . . .	25
II.2.2.2 Schimbul termic prin radiație . . . . .	26
II.2.2.3 Schimbul termic convectiv . . . . .	35
II.2.3 Transfer de masă din mediul gazos în mediul solid . . . . .	36
II.3 Utilizarea metodei elementului finit și a diferențelor finite în rezolvarea problemelor de transfer termic și de masă . . . . .	37
II.3.1 Model de discretizare spațială . . . . .	38
II.3.2 Discretizarea după axa timpului . . . . .	39

II.4	Reglarea adaptivă a parametrilor tehnologici implicați în procese termice . . . . .	40
II.4.1	Principiul reglării cuptoarelor electrice cu încălzire indirectă . . . . .	40
II.4.2	Comanda graduală a puterii electrice de încălzire . . . . .	46
II.5	Încalzirea corpurilor termic subțiri . . . . .	50
II.6	Considerații privind variabilitatea unor mărimi de material . . . . .	52
II.6.1	Variația conductivității termice cu temperatura . . . . .	52
II.6.2	Variația căldurii masice cu temperatura . . . . .	54
II.6.3	Variația masei volumice . . . . .	55
II.6.4	Valorile factorului de emisivitate . . . . .	55
II.6.5	Variația coeficientului de schimb termic convectiv la suprafață . . . . .	55
II.6.6	Variația cu temperatura a rezistenței conductorilor de încălzire . . . . .	56
II.6.7	Variația cu temperatura și concentrația a coeficientului de difuzie masică . . . . .	56
II.6.8	Variația cu concentrația a coeficientului de schimb termic de masă la suprafață . . . . .	56
CAP.III	<b>MODEL MATEMATIC PENTRU OPTIMIZAREA PRIN SIMULARE A UNUI PROCES TEHNOLOGIC COMPLEX REALIZAT ÎN CUPTOARE ELECTRICE CU ÎNCĂLZIRE INDIRECTĂ PRIN REZISTOARE . . . . .</b>	<b>57</b>
III.1	Considerații generale . . . . .	57
III.2	Funcțiile, caracteristicile și structura programului <b>TRATERM</b> . . . . .	60
III.2.1	Destinația și funcțiile programului <b>TRATERM</b> . . . . .	60
III.2.2	Componența și caracteristicile programului <b>TRATERM</b> . . . . .	61
III.2.3	Structura de bază a programului <b>TRATERM</b> . . . . .	64
III.3	Funcțiile și structura subprogramului <b>MOD_CUP</b> . . . . .	65
III.3.1	Destinația și funcțiile subprogramului <b>MOD_CUP</b> . . . . .	65
III.3.2	Precizări privind algoritmul de programare pentru subprogramul <b>MOD_CUP</b> . . . . .	65
III.3.3	Structura și algoritmul de programare pentru subprogramul <b>MOD_CUP</b> . . . . .	69
III.4	Funcțiile și structura subprogramului <b>CALC_REZ</b> . . . . .	82
III.4.1	Destinația și funcțiile subprogramului <b>CALC_REZ</b> . . . . .	82
III.4.2	Precizări privind algoritmul de programare pentru subprogramul <b>CALC_REZ</b> . . . . .	83
III.4.3	Structura și algoritmul de programare pentru subprogramul <b>CALC_REZ</b> . . . . .	84
III.5	Funcțiile și structura subprogramului <b>MOD_SARJ</b> . . . . .	88
III.5.1	Destinația și funcțiile subprogramului <b>MOD_SARJ</b> . . . . .	88
III.5.2	Precizări privind algoritmul de programare în subprogramul <b>MOD_SARJ</b> . . . . .	88
III.5.3	Structura și algoritmul de programare pentru subprogramul <b>MOD_SARJ</b> . . . . .	91
III.6	Funcțiile și structura subprogramului <b>CALC_FV</b> . . . . .	96

III.6.1	Destinația și funcțiile subprogramului <b>CALC_FV</b> . . . . .	96
III.6.2	Precizări privind algoritmul de programare pentru subprogramul <b>CALC_FV</b> . . . . .	98
III.6.3	Structura și algoritmul de programare pentru subprogramul <b>CALC_FV</b> . . . . .	99
III.7	Funcțiile și structura subprogramului <b>SIMUL_TERM</b> . . . . .	105
III.7.1	Destinația și funcțiile subprogramului <b>SIMUL_TERM</b> . . . . .	105
III.7.2	Precizări privind algoritmul de programare pentru subprogramul <b>SIMUL_TERM</b> . . . . .	106
III.7.3	Structura și algoritmul de programare pentru subprogramul <b>SIMUL_TERM</b> . . . . .	110
III.8	Funcțiile și structura programului <b>SIMUL_CARB</b> . . . . .	119
III.8.1	Destinația și funcțiile programului <b>SIMUL_CARB</b> . . . . .	119
III.8.2	Precizări privind algoritmul de programare pentru programul <b>SIMUL_CARB</b> . . . . .	120
III.8.3	Structura și algoritmul de programare pentru programul <b>SIMUL_CARB</b> . . . . .	122
III.9	Funcțiile și structura programului <b>ADAPT_T</b> . . . . .	127
III.9.1	Destinația și funcțiile programului <b>ADAPT_T</b> . . . . .	127
III.9.2	Precizări privind algoritmul de programare pentru programul <b>ADAPT_T</b> . . . . .	128
III.8.3	Structura și algoritmul de programare pentru programul <b>ADAPT_T</b> . . . . .	130
CAP.IV	<b>VALIDAREA PROGRAMELOR PRIN SIMULĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PE UN CUPTOR INDUSTRIAL</b> . . . . .	135
IV.1	Considerații generale privind obiectivul validării . . . . .	135
IV.2	Descrierea constructiv-funcțională a cuptorului . . . . .	137
IV.3	Simularea și validarea prin măsurători experimentale a performanțelor termice ale cuptorului . . . . .	139
IV.3.1	Date constructive utilizate în generarea modelului de cuptor . . . . .	139
IV.3.2	Rezultatele testării cuptorului prin simulare și prin măsurători experimentale . . . . .	142
IV.3.3	Comparație între mărimile determinate prin simulare cu cele determinate prin măsurători . . . . .	146
IV.4	Simularea încălzirii șarjei și validarea prin probe și măsurători experimentale . . . . .	148
IV.4.1	Tipurile de șarjă model testate . . . . .	149
IV.4.2	Rezultatele testării prin simulări și prin măsurători experimentale pentru procesarea termică a șarjei . . . . .	150
IV.4.3	Comparații între rezultatele obținute prin simulare cu cele obținute prin măsurători . . . . .	167
IV.5	Validarea experimentală a programului de reglare adaptivă . . . . .	172
IV.6	Validarea prin simulare a programului de tratament termochimic de carburare . . . . .	173

CAP.V	POSSIBILITĂȚI DE VALORIFICARE A REZULTATELOR LUCRĂRII	175
V.1	Utilizarea programului <del>TTATERM</del> pentru identificarea și optimizarea constructivă a cuptorului . . . . .	176
V.1.1	Identificarea și optimizarea performanțelor termice ale cuptorului . . . . .	176
V.1.2	Identificarea și optimizarea performanțelor nominale ale instalației de încălzire . . . . .	181
V.2	Utilizarea programului <del>TTATERM</del> pentru optimizarea regimului de exploatare a cuptorului . . . . .	183
V.2.1	Optimizarea costului cu energia în regim de exploatare cu întreruperi . . . . .	183
V.2.2	Optimizarea regimului de încălzire a șarjei . . . . .	184
V.2.3	Optimizarea regimului de procesare tehnologică . . . . .	184
CAP.VI	CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚIILE PRINCIPALE ALE LUCRĂRII . . . . .	189
VI.1	Concluzii generale . . . . .	189
VI.2	Contribuțiile principale ale lucrării . . . . .	192
	BIBLIOGRAFIE . . . . .	195
 <u>ANEXE:</u>		
ANEXA 1	Imagini ale cuptorului experimental și ale modului de distribuție a șarjei . . . . .	202
ANEXA 2	Listing după principalele unități sursă din subprogramul de simulare <del>SMUL TERM</del> . . . . .	206

## CUVÂNT ÎNAINTE

Această lucrare s-a născut din dorința de a depăși ceea ce la un moment dat a fost considerat un optim în dezvoltarea echipamentelor electrotehnologice cu aria cea mai mare de reprezentare în industrie, respectiv a cuptoarelor electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare, destinate procesărilor tehnologice la temperaturi ridicate. Acest lucru a fost posibil de realizat prin promovarea sistemelor de calcul ca instrument modern de prelucrare a datelor și de procesare a informațiilor, atât în activitatea de cercetare-proiectare, cât și în activitățile de pregătire a regimurilor optime de procesare tehnologică în exploatare. Pentru validarea rezultatelor lucrării s-a utilizat un caz concret de echipament și de procesare tehnologică. Dacă am reușit sau nu atingerea scopului propus, las la aprecierea celor ce vor avea bunăvoința de a citi lucrarea și ale căror sugestii le aștept cu mult interes.

Primele cuvinte de mulțumire și de recunoștință le adresez domnului profesor *Ioan Șora*, care pe durata ultimilor cinci ani m-a îndrumat și stimulat prin competență și experiență profesională. Sugestiile și încurajările domniei sale au constituit energia necesară depășirii unor momente mai dificile pentru finalizarea în condiții de exigență a lucrării.

Cu multă recunoștință trebuie să mulțumesc domnului profesor *Florin Teodor Tănăsescu* pentru sprijinul permanent și prețiosul material documentar acordat.

Domnului profesor *Virgiliu Firețeanu* îi mulțumesc în mod deosebit pentru sprijinul acordat prin sugestii și aprecieri asupra rezultatelor în domeniul procesărilor numerice și metodelor de analiză numerică.

Domnului profesor *Dan Nanu* îi mulțumesc pentru îndemnurile, încurajările și sprijinul acordat ori de câte ori mi-a fost necesar.

Cu multă recunoștință mulțumesc colaboratorilor mei, domnilor *Gelu Nițu* de la firma *CompArd-SRL Sibiu* și *Horia Comșa* de la firma *Milenium-SA Sibiu*, specialiști în software, pentru aportul în elaborarea pachetului de programe, precum și conducerii *Independența-SA Sibiu* pentru sprijinul acordat în efectuarea probelor și testelor pe cuptor.

Mulțumesc deasemeni prietenilor și colegilor mei de la *INTEC-SA Departamentul Sibiu* care au fost alături de mine pe întreaga perioadă a elaborării și tehnoredactării lucrării.

Nu în ultimul rând mulțumesc familiei, soției și copiilor, pentru răbdarea, înțelegerea și dragostea sufletească cu care m-au încurajat, sprijinit și protejat pe întreaga durată de pregătire și redactare a acestei lucrări.

20 August 1996

*Horea Falotă*





## INTRODUCERE

### A. NECESITĂȚI ȘI OPORTUNITĂȚI.

Cuptoarele electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare reprezintă categoria *echipamentelor electrotermice* cu aria cea mai largă de reprezentare în sectorul producției industriale [18,65,128]. Acest argument de necontestat a constituit motivația pentru care, de peste un deceniu, cercetători și constructori de la firmele cele mai renumite din lume și-au concentrat activitatea în scopul realizării de echipamente cu performanțe tot mai ridicate, atât energetic cât și tehnologic. Preocupările au căpătat o conotație specială odată cu declanșarea crizei energetice, generând studii pentru alternative tehnologice în scopul reducerii consumurilor specifice de energie.

Au fost concepute și realizate echipamente care permit comasarea mai multor faze tehnologice ce pot fi realizate într-o *instalație cu funcționalități multiple* [165]. Pe de altă parte au fost eliminate din ciclul productiv acele categorii de cuptoare în care procesările tehnologice se efectuează cu consumuri energetice mult prea ridicate și pentru care s-au conceput tehnici și utilaje bazate pe procedee neconvenționale, mult mai eficiente energetic. Sunt evidențiate în această categorie tehnicile și echipamentele electrotermice de procesare termică superficială în locul celei de masă în care consumurile specifice sunt mult reduse.

O serie de tehnologii care utilizează energia electrică în scopuri termice nu au putut fi înlocuite cu succes până în prezent, atât sub aspect tehnic cât și economic [18]. În această categorie sunt incluse cuptoarele electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare destinate tratamentelor termochimice de îmbogățire a materialului supus procesării sub atmosfere tehnologice create prin amestecuri de gaze. În cazul acestor cuptoare s-au inițiat studii și cercetări în primul rând pentru modernizarea constructivă a echipamentelor și optimizarea regimurilor funcționale în exploatare.

Direcția comună prin care cercetătorii abordează acest segment al procesului de modernizare, destinat îmbunătățirii performanțelor funcționale a acestor categorii de echipamente, o reprezintă *aprofundarea fenomenologică* pe părți și în ansamblu, a proceselor de natură fizică și chimică ce își au sediul în interiorul lor [65].

Pe de altă parte, au fost înregistrate progrese semnificative în *cercetarea și producția de materiale metalice și ceramice*, atât sub aspectul îmbunătățirii caracteristicilor lor termofizice, al rezistenței mecanice și al rezistenței la acțiuni în medii chimice și corozive. Au fost asimilate totodată mărci materiale noi, performante, care conțin componente de aliere deficitare mult reduse (Ni, Cr).

Concepția și construcția actuală a cuptoarelor valorifică cu efecte remarcabile rezultate unor cercetării ce vor fi prezentate în **capitolul I**.

Printr-o concepție evoluată și printr-o execuție îngrijită se pot asigura, sub aspect energetic, nivele cât mai reduse ale pierderilor la mers în gol, randamente cât mai ridicate de conversie a energiei electrice în energie termică și consumuri prin acumulări cât mai scăzute, iar sub aspect tehnologic o uniformitate cât mai bună a distribuției câmpului de temperatură în cuptor, o inerție

termică cât mai redusă și implicit o productivitate orară cât mai ridicată.

Prin modul în care este exploatat cuptorul pot fi afectați principalii factori care intervin în randamentul global al cuptorului și calitatea produselor supuse tratamentului termic. Sub aspect energetic, cel mai semnificativ factor îl reprezintă *consumul specific de energie electrică pe unitatea de masă a șarjei* [150], care este dependent de durata ciclului de tratament și de structura ciclului de tratament și care influențează valoarea randamentului energetic. Sub aspect tehnologic unul din factorii importanți îl reprezintă durata tratamentului. Un timp de încălzire prea lung poate genera, pe lângă un consum nejustificat de energie și de fluide tehnologice, transformări ireversibile în structura materialului piesei, cu consecințe asupra calității produsului tratat, pe când un timp de încălzire prea scurt afectează calitatea produsului tratat prin nerealizarea tratamentului sau generarea și conservarea unor tensiuni interne [65]. Aceste inconveniente reprezintă cauzele ce conduc în prezent la costuri necontrolabile și nejustificate productiv în tratamentul termic. Aceste costuri se datoresc atât consumului de energie și de fluide tehnologice cât și prin nivelul destul de ridicat al rebutului rezultat prin tratamentele termice. Ori, în prezent, cele mai multe tratamente termice reprezintă *faza finală a procesului de fabricație*, fapt care conferă o importanță specială acestei faze tehnologice [18,36].

Disponibilitățile actuale privind *controlul proceselor tehnologice* sunt dictate de posibilitățile reale de măsură și reglare a parametrilor tehnologici implicați în proces. Astfel, temperatura care poate fi prelevată indirect prin intermediul unui termocuplu amplasat constructiv într-o poziție fixă în raport cu șarja și cu pereții interiori ai cuptorului, poate furniza informații cu o anumită precizie asupra unei singure izoterme a câmpului de temperatură din incinta cuptorului. În privința modului de evaluare a temperaturii în șarjă și mai ales distribuția câmpului de temperatură în diferite puncte ale ei, atunci când ciclul de încălzire este declarat terminat, utilizatorii nu dispun practic de nici o informație. Din start trebuie combătută iluzia existenței unei măsurii comune a temperaturii, la un moment de timp dat, în cele trei părți care compun *ansamblul cuptor (pereți)-rezistoare-șarjă* [12,130]. Aprecieri similare se pot formula și asupra informațiilor privind alți parametri implicați tehnologic în tratamentul termic, cum ar fi difuzia masei carbonice în miezul materialului unei piesei din componența șarjei. În acest caz informația prelevată din proces prezintă o dublă aproximare; în primul rând prin conversia raportului presiunilor relative ale oxigenului din aer și din atmosfera cuptorului în t.e.m, iar în al doilea rând prin conversia acesteia în potențialul de carbon din atmosfera cuptorului ca mărime controlată și reglată în proces [23,109].

Din aceste motive se poate afirma că procesarea propriu-zisă a șarjelor în cuptor este practic *invizibilă* și că rețetele tehnologice de tratament termic se determină în exclusivitate pe datele rezultate din experimentări, probe și determinări tehnologice. Dacă acest lucru este posibil de determinat, cu o anumită aproximare, pentru o producție de serie stabilă, nu același lucru se poate afirma despre o producție diversificată. Pentru a obține date de încredere, privind desfășurarea unui proces tehnologic real, sunt necesare o serie de probe experimentale pe șarje de probă. Rezultatele obținute în final, prin sacrificarea acestor șarje de probă, dau informații cu un nivel acceptabil de valabilitate numai în măsura în care sunt reproduse în timpul procesărilor ulterioare, de la ciclu la ciclu, toate condițiile în care s-au desfășurat probele. Acest lucru este practic

imposibil de realizat din cauza multitudinii variabilelor de proces din care pot fi enumerate doar cele care pot fi anticipate: calitatea materialului din care este prelucrat reperul tehnologic supus tratamentului, modul de dispunere a piesei în cuptor, parametrii energiei electrice de alimentare, parametrii fluidului tehnologic implicat în proces, caracteristicile termice ale cuptorului, încărcarea cu șarjă în raport cu capacitatea nominală și nu în ultimul rând respectarea de către operator a condițiilor tehnologice impuse [42].

În context cu cele afirmate anterior, privind importanța tehnologică a tratamentului termic, ca operație de cele mai multe ori finală produselor industriale ce încorporează o cantitate importantă de materii prime, energie și manoperă, este greu de presupus disponibilitatea utilizatorilor de a sacrifica o șarjă reală, în scopul determinării unor rețete tehnologice necesare procesărilor reale ori de câte ori intervin repere noi în procesul de fabricație [44].

Un factor care influențează atât performanțele funcționale ale unui cuptor electric cu rezistoare, cât și parametrii ciclului de tratament, consumul de energie și calitatea produsului tratat, îl reprezintă *nivelul de automatizare* și calitatea elementelor din componența instalației de automatizare.

Apriori, cuptoarele electrice sunt echipamente ușor de reglat. Această afirmație este însă inexactă dacă se are în vedere ansamblul fenomenologic și caracterul puternic nelinear de variație în timp a parametrilor implicați în procesul tehnologic. Argumente privind ușurința comenzii cuptoarelor electrice se rezumă la posibilitățile de măsură și control a parametrilor energiei electrice de alimentare. Așa cum se va prezenta în **capitolul II**, cuptoarele electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare reprezintă sisteme cu comportare capacitivă, asimilabile cu sisteme de ordinul 2 sau mai mare [38,148].

Sub impactul soluțiilor moderne de izolare cu fibre ceramice, cuptoarele au dobândit caracteristica de *echipamente cu inerție termică redusă* [12,44]. Modificarea comportării dinamice a cuptoarelor a impus reconsiderării teoretice și practice în domeniul tehnicii reglării. Regulatele de tip analogic se dovedesc neperformante deoarece asigură condiții de stabilitate în funcționare doar în jurul valorii la care s-a efectuat acordarea parametrilor de reglare. Ori, cuptoarele electrice industriale sunt sisteme supuse în mod tranzitoriu sau permanent unor perturbații, de natură internă sau externă, a căror amplitudine și durată sunt greu de anticipat și corectat în timp real [60,162,163]. O perturbație dintre cele mai importante o reprezintă însăși șarja de tratat [37]. Aceasta generează pe durata încălzirii o perturbație a cărei amplitudine scade în timp, în general nelinear, pe măsură ce șarja se uniformizează în temperatură, în întreaga masă. Alți factori perturbatori ce pot fi anticipați sunt modificările operate asupra referinței de temperatură, modificarea cantității și naturii șarjei, cât și modificarea parametrilor ciclului tehnologic de procesare.

În aceste condiții cele mai renumite firme de reglatoare din lume au declanșat o competiție, în plină desfășurare, în scopul realizării unor tipuri noi de *aparate și echipamente de reglare echipate cu microprocesor* și cu o inteligență proprie care să le confere caracteristici superioare, în special capacitatea de autoacordare prin identificare și autoadaptare continuu adaptivă sau în anumite situații prescrise [162,163].

Toate aceste considerente legate de creșterea eficienței cuptoarelor industriale cu încălzire indirectă prin rezistoare demonstrează insuficiența abordării în exclusivitate prin modernizare, respectiv numai prin intervenții în

structura constructivă. Pentru obținerea unor *nivele superioare de performanță*, este absolut necesară o abordare mai complexă care să includă pe lângă soluțiile de natură constructivă și soluții de exploatare prin *optimizarea regimurilor de funcționare* și a ciclurilor tehnologice de tratament [42,150].

Mijloacele moderne reprezentate de echipamentele din domeniul informaticii, cu performanțe de calcul ridicate, limbaje de programare din ce în ce mai evoluat și tehnici de analiză numerică tot mai precise, permit o abordare tot mai profundă a unor probleme complexe. Este din ce în ce mai stimulată promovarea informaticii atât în faza de concepție a cuptoarelor electrice, cât și în fazele de pregătire tehnologică și de conducere proces a echipamentelor și liniilor de tratament termic.

Pornind de la aspectele formulate anterior, în etapa actuală se impune cu necesitate schimbarea fundamentală a mentalității privind modalitățile de abordare și de acțiune practică în direcția obținerii unor performanțe superioare vizând întregul proces de modernizare în sectorul tratamentelor termice în general și cuptoarele cu încălzire electrică în special [18,133].

În această lucrare vor fi evidențiate, pornind de la situația actuală în construcția și exploatarea a cuptoarelor cu încălzire electrică prin rezistoare, o serie de contribuții rezultate prin cercetări personale sau ca și coautor în direcția îmbunătățirii constructive și funcționale vizând performanțele termice și energetice, creșterea fiabilității și duranței unor componente constructive precum și creșterea nivelului de automatizare.

## B. SCOPUL ȘI OBIECTIVELE LUCRĂRII.

Variantele constructive, regimurile funcționale și destinațiile tehnologice referitor la cuptoarele electrice industriale cu încălzire indirectă prin rezistoare sunt extrem de diversificate. O abordare globală nu numai că este foarte greoaie dar și ineficientă sub aspectul realizării unor obiective concrete. Din aceste motive se impune limitarea domeniului de preocupări la segmentul cel mai reprezentativ în sectorul industrial, în prezent și care are șanse reale de a se menține în competiție în viitor. Pornind de la aceste considerente se definesc cu justificările impuse, următoarele:

a) *Tipul cuptoarelor* supuse analizei, atât sub aspectul testării performanțelor constructive cât și funcționale, sunt reprezentate de *cuploarele de tip cameră și cilindric verticale, cu vatră fixă, cu încălzire indirectă prin rezistoare metalice*, destinate tratamentelor termice sub atmosfere controlate de tip endotermic. Regimul de funcționare al acestor cuptoare este *discontinuu*, respectiv operațiile de încălzire-deșarjare se efectuează odată pe ciclul de tratament.

Justificarea alegerii acestei categorii de cuptoare se motivează prin: gradul de reprezentare de peste **70%** în dotarea actuală, se manifestă interes din partea utilizatorilor spre achiziționarea în continuare de asemenea echipamente sau de modernizare a celor existente, fiind considerate echipamente flexibile în exploatare prin capacitatea lor de adaptare unei producții diversificate. Din punct de vedere energetic impun soluții de optimizare în exploatare, fiind deficitare regimurilor de procesare discontinuu;

b) *Tipul rezistoarelor* sunt cele confecționate din *materiale metalice refractare, de tip masiv, din sârmă, bandă sau țevă*. Forma constructivă a rezistoarelor este cea în *formă de zig-zag* dispuși aparent, pe un rând sau pe

mai multe rânduri paralele, în raport cu pereții laterali interiori ai cuptorului.

Justificarea alegerii acestei modele de rezistoare este motivată prin: asigurarea rezistenței mecanice la temperaturi ridicate de utilizare, asigurare a unei duranțe cât mai mari în exploatare și obținerea unei eficiențe cât mai ridicate la transferul termic prin radiație;

c) *Tipul de tratament termic complex reprezentativ* este cel de *tratament termochimic de cementare în mediul gazos*, realizat la temperaturi între 880–980°C, destinat durificării superficiale a materialelor metalice. Acest tip de tratament se realizează printr-un proces dual care implică doi parametri tehnologici controlați și reglați în timp și în limite foarte precise (temperatura și potențialul de carbon din atmosfera din incinta de tratament). În acest caz, timpul în care se realizează procesul în condiții tehnologice de calitate impuse pentru produsul final tratat, reprezintă un parametru deosebit de important și totodată greu de estimat.

Justificarea alegerii acestui tip de tratament este motivat prin: este cel mai răspândit și deosebit de important în producția industrială și nu poate fi realizat decât în cuptoare cu încălzire electrică prin rezistoare care pot asigura controlul și reglajul atmosferelor de tratament obținut prin amestecuri de gaze;

d) *Tipurile de șarje reprezentative* supuse tratamentelor în sectorul industrial sunt cele constituite din *piese divizate, distribuite fie ordonat prin dispozitive speciale, fie prin cazarea lor dezordonată în formă de vrac*. Natura șarjelor este metalică, din oțeluri aliate și este în general omogenă. Configurarea șarjei în cuptor este de *tip stabil*. Șarjele reale sunt constituite din masa netă a pieselor de tratat și dintr-o masă suplimentară reprezentată de suportii și dispozitivele de susținere și transport. Caracteristica principală a pieselor supuse tratamentului termic este cea de *piese termic subțiri* [45].

Justificarea alegerii acestei categorii de șarje se motivează prin ponderea pe care o reprezintă reperele tehnologice de dimensiuni reduse în producția industrială și de necesitatea de a constitui cu aceste repere șarje care să acopere capacitatea nominală de încărcare a cuptorului;

e) *Regimul de reglare al puterii*, cel mai frecvent utilizat, este cel *bipozițional*, altfel numit *regimul tot-nimic*, în care puterea electrică absorbită de rezistoare, alimentate la o tensiune constantă, este furnizată **100%**, iar factorul care determină puterea medie absorbită pe o perioadă de timp este timpul de conducție și de neconducție dat prin comanda regulatorului. Sistemul cel mai nou utilizat este cel de dozare a puterii prin contactori statici care funcționează pe principiul trenului de undă întreagă cu număr de perioade fix sau variabil dat de raportul între timpul de conducție și timpul total de ciclu.

Justificarea alegerii acestei soluții se motivează prin interesul energetic și tehnologic de a realiza o dozare continuă a puterii injectate în rezistoare, printr-un sistem de reglare adaptiv, funcție de necesarul de putere la un moment de timp pe durata ciclului de tratament, soluție care asigură nivelul cel mai redus de perturbații de natură energetică [12,138];

f) *Regimul de reglare a temperaturii* în cuptor se realizează în prezent după *temperatura măsurată cu termocuplul din dotare*, care este comparată cu referința indexată pe regulator și care reprezintă temperatura de tratament. În general pantele de încălzire și de răcire nu sunt programate, singura referință programată este temperatura de menținere la un palier prescris tehnologic. Posibilitățile actuale de control a temperaturii elementului rezistiv de tip tubular crează premisele realizării unei porțiuni din ciclul de încălzire după o *referință*

supraindexată, mai mică sau cel mult egal cu temperatura maximă de utilizare a rezistoarelor [130,164,166].

Justificarea alegerii acestei soluții este motivată prin: posibilitatea practică de a măsura temperatura din incinta de tratament a unui cuptor și de imposibilitatea de a măsura direct temperatura din diferite zone ale unei șarje reale;

Obiectivul principal al lucrării este de a determina soluții de *optimizare constructiv-funcțională* a cuptoarelor electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare, având regim de funcționare discontinuu și destinat tratamentelor termochimice sub atmosfere controlate. Motivația principală derivă din convingerea existenței unor multiple și reale posibilități actuale și de perspectiva apropiată de îmbunătățire a performanțelor termoenergetice globale, prin soluții constructive dar mai ales prin imprimarea unor regimuri optime în exploatare, ca principal garant în obținerea unor performanțe maxime pentru un cuptor. Acest obiectiv poate fi obținut prin compunerea mai multor vectori care pot influența rezultatul final într-un sens sau altul:

a) *optimizarea constructivă vizând reducerea consumurilor de energie și de fluide tehnologice*, datorate în principal pierderilor cuptorului dar și pierderilor prin neutilizarea la capacitatea și productivitatea nominală a acestuia;

b) *optimizarea constructivă vizând îmbunătățirea performanțelor termice* ale cuptorului, cum ar fi creșterea densității de putere raportat la unitatea de suprafață a peretelui încălzitor și îmbunătățirea transferului termic de la sursa de încălzire la suprafața șarjei;

c) *optimizarea regimului de încălzire* a cuptorului *prin conducerea procesului după temperatura la suprafața șarjei* (Fig.1.6), ceea ce permite reglarea temperaturii, pentru o anumită perioadă a ciclului de încălzire, după temperatura rezistorului controlată la limita maximă de utilizare, în scopul scurtării duratei timpului de încălzire. Acest obiectiv poate fi realizat admitând posibilitatea tehnologică de încălzire a șarjei la suprafața cu un gradient de temperatură neimpus. În acest regim pierderile globale ale cuptorului cresc;

d) *optimizarea regimului de dozare a puterii electrice în mod continuu printr-o comandă adaptivă*, utilizând echipamente electronice de putere cu tiristoare care prin intermediul unui sistem de reglare numerică realizează optimizarea adaptivă a consumului de energie la nivelul cererii provenite din proces;

e) *optimizarea duratei ciclului de procesare tehnologică prin determinarea cu anticipare prin simulare* a procesului de tratament în ansamblul lui și sub restricțiile de natură tehnologică, a elementelor de construcție a diagramei de proces în limitele necesităților și disponibilităților reale. Această soluție se aplică cu inconvenientele generate de restricțiile de natură tehnologică, restricții ce pot diminua nivelul maxim de performanță a cuptorului;

f) *optimizarea ciclului de procesare tehnologică reală prin conducerea programată prin calculator*, sau alte echipamente de automatizare inteligente utilizând ca sursă de procesare rezultatele determinate prin simulare dar și prin softuri de optimizare capabile să corecteze mărimile de comandă către proces în funcție de evoluția parametrilor implicați, prelevați prin senzori din proces.

În lucrare va fi prezentat în detaliu structura unui instrument bazat pe o structură completă de *software* destinat atât optimizării constructive a cuptoarelor cât și optimizării regimurilor de procesare în faza de pregătire tehnologică, precum și structuri de *software și hardware* destinate conducerii numerice a prin control adaptiv-optimal al proceselor de tratament termic.

## **CAP. I STADIUL ACTUAL PRIVIND PERFORMANȚELE CONSTRUCTIV-FUNCȚIONALE ALE CUPTOARELOR ELECTRICE CU REZISTOARE**

### **I.1. IMPORTANȚA TEHNOLOGICĂ A CUPTOARELOR ELECTRICE CU ÎNCĂLZIRE INDIRECTĂ PRIN REZISTOARE**

Cuptoarele electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare au ca principală utilizare tratamentul termic convențional. Această categorie de echipamente prezintă posibilități de utilizare pentru un domeniu relativ mare al temperaturilor de lucru și pentru efectuarea de procesări tehnologice din cele mai diverse unei categorii largi de produse materiale. Această caracteristică este conferită în principal de posibilitatea valorificării separate sau integrate a celor trei moduri de bază ale transferului termic [128,165]. Din punct de vedere constructiv aceste echipamente pot fi împărțite în două categorii: cu *incintă de formă paralelipipedică* și cu *incintă de formă cilindrică*, cu *vatră fixă sau mobilă*. Din punct de vedere al domeniului de temperatură ele sunt împărțite în patru categorii: de temperaturi scăzute (**max.300°C**), de temperaturi medii (**max.750°C**), de temperaturi ridicate (**max.1250°C**) și de temperaturi foarte ridicate (**max.3000°C**). În ce privește modul de dispunere a șarjei în cuptor ele pot fi: cu *șarjă de tip stabil*, în care regimul de șarjare-deșarjare este ciclic discontinuu sau *șarje de tip mobil*, în care regimul de șarjare-deșarjare și de antrenare a șarjei prin cuptor se realizează continuu sau în tact. Destinația tehnologică este extrem de diversificată și cuprinde, practic, *întreaga gamă a tratamentelor termice primare sau secundare*. Mediul de tratament este în majoritatea cazurilor aerul, însă atitudinea principală a cuptoarelor electrice cu încălzire indirectă prin rezistori este acela că permite realizarea de tratamente termice în alte medii decât aerul, precum vidul sau atmosferele tehnologice.

Interesul principal față de acest tip de cuptoare, comparativ cu cuptoarele care utilizează încălzirea indirectă prin arderea combustibililor, constă în: randamentul ridicat al conversiei energiei electrice în energie termică (85-90%) [165], nivelul redus al pierderilor totale, posibilitatea obținerii unei uniformități superioare a câmpului de temperatură în incinta de tratament, posibilități simple de măsură și control a parametrilor energetici, gabarite reduse, ușurință în exploatare și întreținere, asigurarea mediului curat, nepoluant atât în interiorul cât și în exteriorul incintei de tratament, posibilitățile multiple de implementare a echipamentelor moderne de automatizare și informatizare a utilajelor și proceselor de tratament termic industrial [42,48,128].

După modul în care este realizată operația de șarjare-deșarjare se împart în două categorii funcționale principale:

a) *cu funcționare continuă*, în care șarja este introdusă ritmic sau continuu, staționând temporar într-un anumit mediu din incinta de tratament. Ciclul tehnologic în acest caz se realizează în timp prin antrenarea cu o anumită viteză de parcurgere a șarjei prin diferitele zone termice ale cuptorului.

Regimul termic al acestor cuptoare se poate considera staționar în permanența ceea ce constituie un avantaj. Acest tip de cuptoare prezintă însă o serie de inconveniente atât tehnologice cât și energetice, fapt care le limitează aria de utilizare. În primul rând, sub aspect tehnologic ele sunt greu de adaptat

schimbărilor care pot intervenii în ciclul productiv fiind concepute pentru o anumită destinație tehnologică. În al doilea rând, sub aspect energetic acest tip de cuptoare generează pierderi suplimentare pe durata funcționării prin dispozitivele de antrenare (benzi transportoare, platouri, căruciare ș.a). Din cauza inflexibilității lor în exploatare, aceste tipuri de utilaje sunt utilizate doar în sectoare cu producție de serie stabilă.

b) *cu funcționare discontinuă*, în care șarja este introdusă ciclic, staționând stabil în incinta de tratament. Regimul termic al acestor cuptoare suferă variații de amplitudine și durată diferită, de la ciclu la ciclu de tratament, ceea ce constituie un dezavantaj.

Sub aspect tehnologic ele sunt însă preferate de utilizatori datorită flexibilității lor în exploatare prin capacitatea lor de a se adapta unei producții diversificate și unor cicluri tehnologice neconvenționale. Prin aceste avantaje cuptoarele cu funcționare discontinuă s-au impus și ocupă în prezent primul loc în sectoarele de tratament termic industrial.

O caracteristică comună a modului de utilizare în exploatare a cuptoarelor cu încălzire electrică prin rezistoare, este că în majoritatea cazurilor operațiile de șarjare-deșarjare se efectuează "la cald", cuptorul este adus la temperatura de tratament și în regim staționar înaintea introducerii șarjei în cuptor. Acest mod de utilizare se impune atât sub aspect energetic cât și sub aspectul productivității.

Dat fiind interesul manifestat de tehnologi pentru categoria cuptoarelor cu regim de funcționare discontinuu, în cadrul lucrării preocupările se vor limita la acest tip de cuptoare. Așa cum se va vedea ulterior problemele privind optimizarea constructiv-funcțională la aceste cuptoare capătă un grad ridicat de complexitate. Motivul principal care generează această complexitate îl reprezintă nespecificarea din faza de concepție a unor condiții precise vizând regimul de utilizare sub aspect tehnologic.

## I.2 SITUAȚIA ACTUALĂ ÎN CONSTRUCȚIA ȘI EXPLOATAREA CUPTOARELOR ELECTRICE.

### I.2.1. Criterii de evaluare a performanțelor.

Cuptoarele electrice industriale cu încălzire indirectă prin rezistoare având regim de funcționare discontinuu, destinate tratamentelor termice, trebuie evaluate sub aspectul performanțelor, atât energetic cât și al utilizării tehnologice. Un mod tradițional de evaluare a performanțelor unui cuptor îl reprezintă analiza prin bilanț termic, ca rezultat al unui set de măsurători și determinări experimentale. Structura generală a unui bilanț termic asupra unui cuptor electric cu funcționare discontinuă, destinat tratamentelor termochimice sub atmosfere protectoare este reprezentat în Figura 1.1 [12,150].



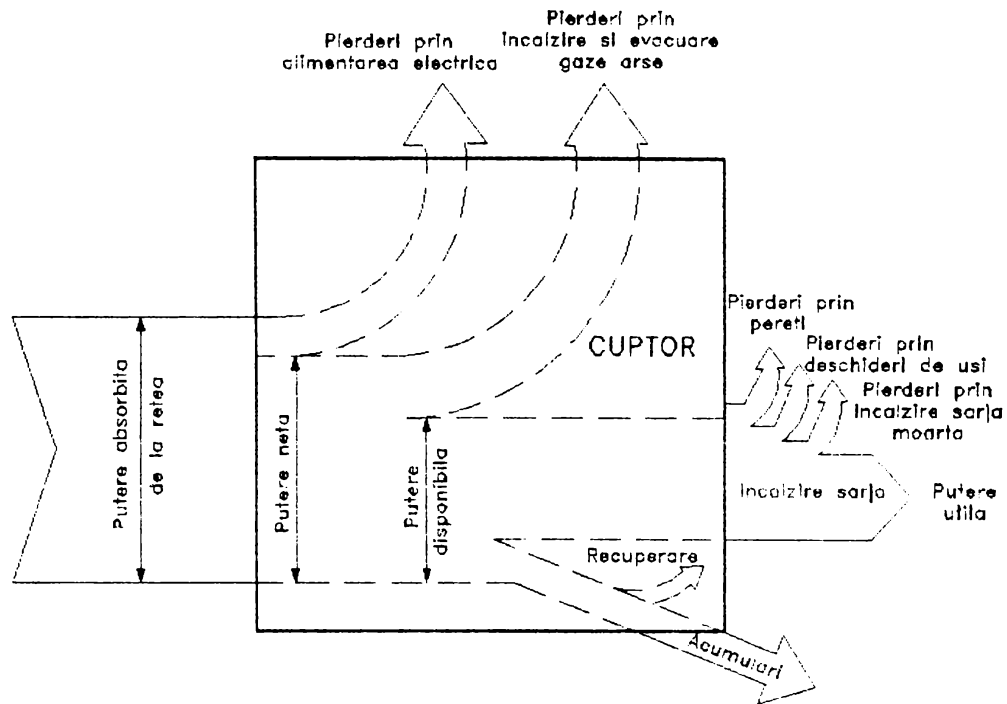


Fig.1.1 Structura de bilanț termic a unui cuptor electric cu funcționare discontinuă

În preocupările actuale ale cercetătorilor și constructorilor de cuptoare electrice se apelează cel mai frecvent la analize fără prejudecăți a tuturor consumurilor neproductive de energie care pot afecta randamentul unui cuptor, căutând, fie să elimine, fie să diminueze fiecare pierdere, chiar și a celor care la prima vedere par ne semnificative. În acest scop se utilizează adesea tehnici de analiză comparativă prin simulări pe calculator pentru a determina soluțiile optime. Deoarece analiza performanțelor globale ale unui utilaj nu pot fi limitate numai la cele care rezultă printr-o analiză de bilanț termic, în ceea ce urmează vor fi menționate câteva elemente care definesc performanțele constructiv-funcționale ale unui cuptor electric din categoria celor cu funcționare discontinuă:

**a) performanțe energetice constructive**

Principalele caracteristici ce definesc performanțele energetice constructive ale unui cuptor electric cu încălzire indirectă prin rezistoare sunt [47,150,165]:

- *pierderile la mers în gol*, datorate în primul rând pierderilor prin conducția termică a pereților izolatori, caracterizează capacitatea termoizolantă a structurii pereților cuptorului. Aceste pierderi reprezintă în mod real doar o parte din pierderile totale ale unui cuptor. Ele pot fi în unele cazuri chiar dublate prin așa numitele *pierderi suplimentare*, generate atât de elementele constructive (scurtcircuite și traversări termice prin pereți, pierderi prin neetanșeități ș.a), cât și prin factori de natură tehnologică (deschideri uși sau

capace, utilizarea de fluide tehnologice care pătrund reci în cuptor ș.a).

Aceste pierderi influențează consumul de energie total pe durata unui ciclu de tratament și au o variație crescător nelineară cu temperatura din cuptor;

- *inerția termică a cuptorului*, caracterizează capacitatea de acumulare și de cedare a căldurii prin elementele constructive ale cuptorului, dintre care izolația termică este cea mai importantă. Mărimea inerției termice are conotații atât de natură energetică (necesarul de energie consumată pentru creșterea cu un grad al temperaturii) cât și de natură tehnologică deoarece influențează productivitatea cuptorului (influență asupra timpului de atingere a temperaturii de lucru).

Această caracteristică privită strict sub aspect energetic are o deosebită importanță deoarece influențează consumul neproductiv de energie necesar acumulării pe durata punerii în regim staționar de funcționare a cuptorului;

**b) performanțe energetice în exploatare**

Principalele caracteristici care definesc performanțele energetice în regim de exploatare ale unui cuptor sunt [44,150,165]:

- *consumul total de energie*, pe durata ciclului de tratament termic care este influențat de durata ciclului de tratament și de structura diagramei tehnologice de tratament, care poate să conțină succesiuni de faze cu răcirii și încălziri repetate, între nivele de temperaturi diferite;

- *consumul specific de energie*, pe unitatea masică a șarjei brute, care este influențată de gradul de încărcare a cuptorului;

- *randamentul energetic* al cuptorului, care este influențat de durata ciclului de tratament;

- *randamentul global* al cuptorului, care este dictat de gradul de utilizare ritmică sub sarcină productivă, de durata și frecvența întreruperilor în funcționare prin defecțiuni sau prin lipsă de șarjă;

**c) performanțe constructive de natură tehnologică**

O serie de caracteristici conferite unui cuptor își au motivația unor solicitări tehnologice, cum sunt [44]:

- *uniformitatea* câmpului de temperatură în spațiul util al camerei cuptorului, respectiv a zonei ocupate de șarjă. Această performanță caracterizată prin ecartul de temperatură admis între punctul cel mai rece și punctul cel mai cald din cuptor ce poate fi impus în anumite situații destul de strâns (2-5°C). Această uniformitate se realizează constructiv prin modul de distribuție a rezistorilor pe pereți, prin asigurarea unei convecții eficiente, pentru temperaturi sub 700°C, prin asigurarea unei etanșări corespunzătoare și prin asigurarea unei densități uniforme a fluxului termic în cazul cuptoarelor cu funcționare la temperaturi ridicate;

- *viteza de încălzire și de răcire* naturală a cuptorului, cât mai ridicate conferă posibilități de adaptare flexibilă în exploatare. Acest lucru poate fi considerat numai în context cu un nivel corespunzător de automatizare care să asigure adaptarea funcționării utilajului în conformitate cu cerințele de proces fără a periclita calitatea tratamentului.

**1.2.2. Caracteristicile termoenergetice ale cuptoarelor electrice concepute și executate în țară.**

În ultimii 20 de ani, INDEPENDENȚA Sibiu, prin fabrica de utilaj metalurgic,

a executat, pe baza documentațiilor de execuție elaborate la ICPTSCM-Filiala Sibiu, un număr de peste 10000 exemplare cuptoare electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare și regim de funcționare discontinuu, într-o *gamă tipodimensională de fabricație*, destinate noilor investiții din industria românească, cât și, în măsură mai mică, pentru export. Destinația tehnologică a acestor cuptoare a fost, în general, pentru tratamente termice convenționale dar și pentru tratamente termice sub restricții tehnologice foarte severe, cum sunt cele pentru industria de automobile, de aviație și de componente pentru centrale nucleare.

Prin concepție, aceste cuptoare nu au avut în general o destinație tehnologică și productivă specificată, ele fiind concepute pe criteriile de tipizare constructivă, în care elementele de încadrare în structura gamei tipodimensionale au constituit-o *spațiul util și domeniul temperaturilor de lucru*. Legătura cu sarcina nominală de tratament s-a realizat prin definirea așa numitei *șarje reprezentative*, fapt ce a generat un inconvenient important în exploatare. Odată introduse în liniile tehnologice de fabricație, cu impunerea unei anumite productivități și mai ales cu un anumit specific de fabricație, aceste cuptoare au trebuit să facă față unei sarcini concrete, atât tehnologic cât și productiv.

În multe situații s-a dovedit că aceste cuptoare au fost supradimensionate în putere pentru încălzire ceea ce le face din start ineficiente sub aspect energetic [60].

În Tab.1.1 și Tab.1.2 sunt date caracteristicile cele mai semnificative pentru cuptoarele electrice industriale cu regim de funcționare discontinuu, de tipul cuptoarelor cameră și verticale cu vatră fixă care fac parte din gama tipodimensională executate în țară și aflate în exploatare la diverși utilizatori. Datele specificate în tabele sunt în cea mai mare parte extrase din documentația de execuție. Pentru cuptoarele la care au fost efectuate testări valorile din tabel corespund celor determinate sau validate prin probe.

Cu toate că se impunea o comparație a acestor performanțe cu cele ale cuptoarelor realizate de cele mai renumite firme constructoare din lume, acest lucru nu a fost posibil deoarece firmele nu furnizează decât date constructive nominale și de montaj.

Tabel 1.1

Temp. max. de utiliz [°C] Mediu	Dimensiuni ale spațiului util [m]			Șarja nomin. brută [kg]	Pute-rea el. de încălzire [kW]	Timp încălzire șarjă [h]	Tip izolație					
							Cu cărămidă			Cu fibră ceramică și cărămidă în vatră		
	L	A	H				Pierderi totale [kW]	Căld. acumulată [kWh]	Consum specific kWh/kg	Pierderi tot. [kW]	Căld. acumulată [kWh]	Consum specific kWh/kg
700 aer	0,6	0,6	0,4	200	27	2,2	9,5	162,5	0,344	8,9	65	0,326
	0,6	1,2	0,4	500	54	2,2	11,8	263,7	0,262	10,6	135	0,260
	1,0	1,5	0,6	1200	80	3,5	21,8	529,5	0,251	14,7	306	0,245
	1,0	2,5	0,8	3000	135	4,5	23	890,8	0,209	22	356,5	0,209
1000 aer	0,6	0,6	0,4	200	46	1,3	9,3	780,4	0,369	8,2	234,4	0,343
	0,6	1,2	0,4	500	93	1,54	18	1056	0,322	14,7	254,4	0,315
	1,0	1,5	0,6	1200	126	3	21,3	1186,5	0,332	19,1	632	0,315
	1,0	2,5	0,8	3000	154	6	28	1465,1	0,316	27,1	744,2	0,309
1000 gaz inert	0,6	0,6	0,4	200	46	1,3	10,6	7894	0,355	9	250,8	0,345
	0,6	1,2	0,4	500	93	1,54	18	1050,2	0,322	15	254,5	0,316
	1,0	1,5	0,6	1200	126	3	21	1186,5	0,322	—	—	—
	1,0	2,5	0,8	3000	154	6	29	1465,1	0,317	15,3	960,9	0,315
1000 gaz ENDO	0,6	0,6	0,4	200	45	1,3	10	359	0,589	—	—	—
	0,6	1,2	0,4	500	90	1,5	22,5	502,8	0,326	13,8	531	0,263
	1,0	1,5	0,6	1200	200	2	60,3	196,9	0,59	—	—	—
1200 aer	0,6	0,6	0,4	200	40	3	—	—	—	9,6	3,2	0,478
	0,6	1,2	0,4	500	61	4	—	—	—	14	128,3	0,398
	1,0	1,5	0,6	1200	93	5,6	—	—	—	23,4	240,3	0,398
	1,0	2,5	0,8	3000	195	6,5	—	—	—	33,8	620,1	0,351

Caracteristicile cuptoarelor electrice industriale de tip cameră fabricate în România

Tabel 1.2

Temp. max. de utiliz [°C] Mediu	Dimens. spațiului util [m]		Sarja nomin. brută [kg]	Pute-rea el. de încălzire [kW]	Timp încălzire șarjă [h]	Tip izolare					
	φ	H				Cu cărămidă			Cu fibră ceramică și cărămidă în vatră		
						Pier-deri totale [kW]	Căld. acumu-lată [kWh]	Consum speci-fic kWh/kg	Pier-deri tot. [kW]	Căld. acumu-lată [kWh]	Consum speci-fic kWh/kg
700 aer	0,35	0,5	120	26	0,9	4	87,2	0,27	2,1	67,4	0,217
	0,35	1,0	280	50	0,9	5	130,2	0,177	4	82,6	0,161
	0,5	0,8	300	47	1,3	15	117,9	0,253	4,3	90,5	0,178
	0,6	1,2	500	50	2,1	12,1	310,1	0,51	8,7	82,1	0,187
	1,0	1,5	1500	96	2,5	16,5	517,8	0,168	12	106,9	0,138
	1,0	3,0	2500	150	2,6	25	648,3	0,161	18	159	0,164
	1,5	5,0	5000	300	4,6	60	1549,7	0,342	33	352,6	0,276
700 NH <sub>4</sub>	0,35	0,5	120	28	1,15	9,4	87,2	0,288	4	67,4	0,26
	0,6	1,2	500	50	2	8	545,9	0,218	7,3	120	0,214
	1,0	1,5	1500	150	2,8	27,2	372	0,308	10,5	231,3	0,247
1000 aer	0,6	1,2	500	75	1,3	12,2	500	0,299	8,7	120,6	0,232
	1,0	1,5	1500	155	2,4	22,7	793	0,268	20	288,7	0,261
	1,0	3,0	2500	310	2,2	44,5	1762,9	0,263	32,7	372,1	0,221
	1,5	5,0	5000	500	3	110	2619,4	0,372	48,7	402,3	0,229
1000 gaz ENDO	0,5	0,8	300	47	2,2	13,6	669,5	0,344	12	336,7	0,344
	0,6	1,2	500	78	2,3	15	507,4	0,353	13,2	137	0,353
	1,0	1,5	1500	157	2,8	32,6	793	0,313	27,7	253,5	0,303

Caracteristicile cuptoarelor electrice industriale de tip vertical fabricate în România

### I.3 SOLUȚII MODERNE DE ÎMBUNĂTĂȚIRE A PERFORMANȚELOR CONSTRUCTIV-FUNCȚIONALE A CUPTOARELOR ELECTRICE

#### I.3.1 Soluții constructive vizând performanțele energetice.

Dintre soluțiile tehnice constructive aplicate în urmă cu 10 ani, care au constituit un real succes prin efectele energetice spectaculoase, s-a evidențiat înlocuirea izolației termice a cuptoarelor, parțial sau total, din cărămidă sau betoane refractare prin straturi de izolație din fibre ceramice refractare. Aceste materiale prezintă o dublă calitate energetică, pe de o parte prezintă o conductivitate termică redusă, iar pe de altă parte prezintă o capacitate de acumulare de c.c.a 5-8 ori mai mică decât cea a cărămizilor refractare grele, datorită masei volumice redusă tot de atâtea ori [12,150.165]. Aceste caracteristici conferă cuptorului o nouă calitate și anume de echipament tehnologic cu inerție termică redusă, generând posibilități de creștere a productivității cuptorului prin scurtarea timpului de punere în temperatură și de atingere a regimului termic staționar și nu în ultimul rând asigură o reducere substanțială a consumului specific de energie electrică pe ciclul de tratament tehnologic. Totodată, trebuie remarcată contribuția implementării acestei soluții la reducerea gabariturii și a greutateii totale a cuptorului, prin reducerea grosimii stratului de izolare.

În Fig.1.2 sunt reprezentate, sub formă de grafic comparativ, elementele de performanță care rezultă prin înlocuirea izolației din cărămidă refractară cu izolație din fibră ceramică refractară, pentru aceleași condiții de temperatură în interiorul cuptorului.

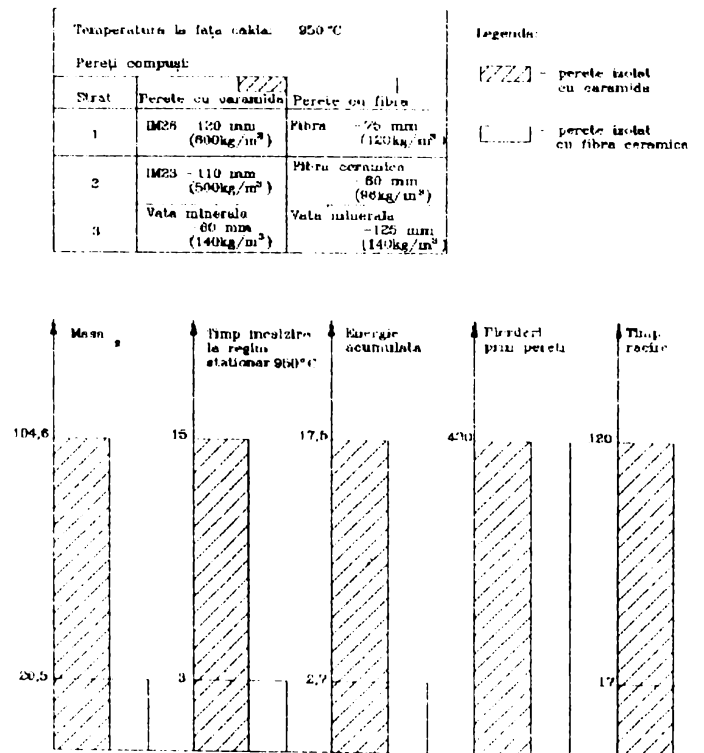


Fig.1.2 Parametrii de performanță comparativi pentru structuri diferite de izolare termică.

Din nefericire, soluția de înlocuire a structurii de izolare termică nu a putut fi operată și pentru o categorie foarte răspândită de cuptoare și anume a celor care funcționează cu atmosfere controlate care vine în contact direct cu stratul interior de izolație. Acest lucru își are motivația în *caracterul higroscopic al fibrelor ceramice* [79,109], care poate afecta calitatea atmosferei de tratament, precum și o rezistență redusă a acestuia la atacul chimic al unor componente din atmosfera de tratament.

Soluțiile actuale de montaj al fibrelor în cuptor conduc la o sursă de pierderi provocate de scurtcircuite termice prin cuiele metalice de fixare sudate pe mantaua cuptorului [12].

Tot în categoria soluțiilor constructive promovate din considerente energetice și care urmează a fi generalizate în viitorul apropiat sunt:

- utilizarea *alimentării prin transformatoare coboritoare de tensiune* cu două înfășurări în secundar, în loc de trei, ceea ce reduce la jumătate pierderile prin traversarea pereților cuptorului și prin traseele electrice de alimentare [84];

- utilizarea de motoare electrice, pentru antrenarea ventilatoarelor și agitatoarelor, prevăzute din fabricație cu *axul înfășurării rotorice confecționat din materiale refractare*, soluție care elimină pierderile provocate în prezent prin apa de răcire forțată a lagărelor. Apa de răcire a lagărelor poate pătrunde accidental în cuptor și poate genera inconveniente de natură tehnologică, în special în cazul cuptoarelor cu atmosferă controlată [109,127,128];

- utilizarea de *vetre izolate cu carbură de siliciu*, material care prezintă o foarte bună rezistență mecanică la cald [150]. În acest fel se elimină din construcția cuptorului părțile metalice de transport și susținere șarjă, respectiv se reduc consumurile prin acumulări și se reduce inerția termică a cuptorului;

- utilizarea de *aparatură de reglare numerică* cu caracteristica de autoadaptare a parametrilor funcției de reglare în raport cu evoluția și cerințele procesului [37,38];

- utilizarea de *echipamente electronice de modulare continuă a puterii*, în raport cu comanda adaptivă a regulatorului ceea ce conduce la o optimizare a consumului de energie raportat la cerințele procesului [155,156].

### I.3.2. Soluții privind îmbunătățirea performanțelor funcționale

Soluțiile vizând îmbunătățirea performanțelor funcționale în exploatare, care au fost aplicate până în prezent cu rezultate foarte bune, acoperă trei zone de interes: al creșterii productivității, al duranței și al calității proceselor prin automatizare.

#### a) sub aspectul productivității

Pornind de la o analiză atentă a legii lui Stefan-Boltzmann și a factorilor implicați în transferul termic prin radiație, este posibil de a determina soluții practice de îmbunătățire a transferului termic prin radiație în cuptoare care funcționează la temperaturi ridicate [166]. Se evidențiază două posibilități de a majora fluxul termic emis prin radiație de la sursa reprezentată de elementele rezistive de încălzire. Aceste posibilități sunt conferite de temperatura sursei calde, respectiv a rezistorului și așa numita *funcție de transfer termic prin radiație* și care reprezintă produsul între factorul geometric de vedere între rezistor și șarjă cu suprafața de emisie efectivă a rezistorului ( $F_{r-s} * S_r$ ) [166]. Temperatura rezistorului reprezintă pe departe factorul cel mai important în

creșterea densității fluxului termic emis dinspre peretele încălzitor spre șarjă. Această eficacitate este mai evidentă în prima fază a timpului de încălzire a șarjei și anume atunci când suprafața șarjei se găsește la o temperatură mult inferioară celei al rezistorului. Utilizând rezistorul la o temperatură cât mai ridicată, limitată doar de valoarea maxim admisă de utilizare, pe o perioadă de timp în care temperatura la suprafața șarjei este sub cea de tratament și completat cu o automatizare corespunzătoare, pot fi reduși în mod substanțial timpii de încălzire, rezultând implicit o creștere a productivității. Totuși, trebuie menționat că această creștere în intensitate a fluxului termic la suprafața șarjei poate fi inacceptabilă în anumite situații sub aspect tehnologic.

Al doilea factor care poate influența eficacitatea transferului termic prin radiație este evidențiat prin soluții de concepție (Fig.1.3). Există două posibilități de a valorifica aceste avantaje:

- de a utiliza rezistoare din materiale ceramo-metalice, de tipul SuperKanthal care permit utilizarea până la temperaturi de max. 1700°C, dar prin costuri ridicate dictate de costul actual al acestor tipuri de rezistoare [158];

- de a utiliza rezistoare din metalice refractare, în construcție masivă sub formă de țevă, care pot funcționa în siguranță la temperaturi de max. 1150°C și care pot fi configurați în așa fel încât se poate optimiza funcția de transfer termic prin asigurarea unui factor de vedere cât mai mare de către o suprafață cât mai mare de radiație a rezistorului ( $F \cdot S$ ) [160,166]. Acest lucru este posibil de obținut printr-o alegere optimă a raportului dintre diametrul rezistorului și pasul între două ramurii învecinate ale unui element încălzitor ( $d/p$ ).

Utilizând rezultatele acestei analize, s-a obținut una din performanțele cu care cuptoarele electrice cu rezistoare erau în inferioritate, față de cele încălzite prin combustibili și anume viteza de încălzire. Dacă până în prezent nu se putea obține densități ale fluxului termic peste max. 20kW/m<sup>2</sup> pe peretele cuptor, adoptând soluția încălzitorilor din țevă se pot obține densități de până la 80 kW/m<sup>2</sup> pe aceeași suprafață a peretelui cuptorului [49].

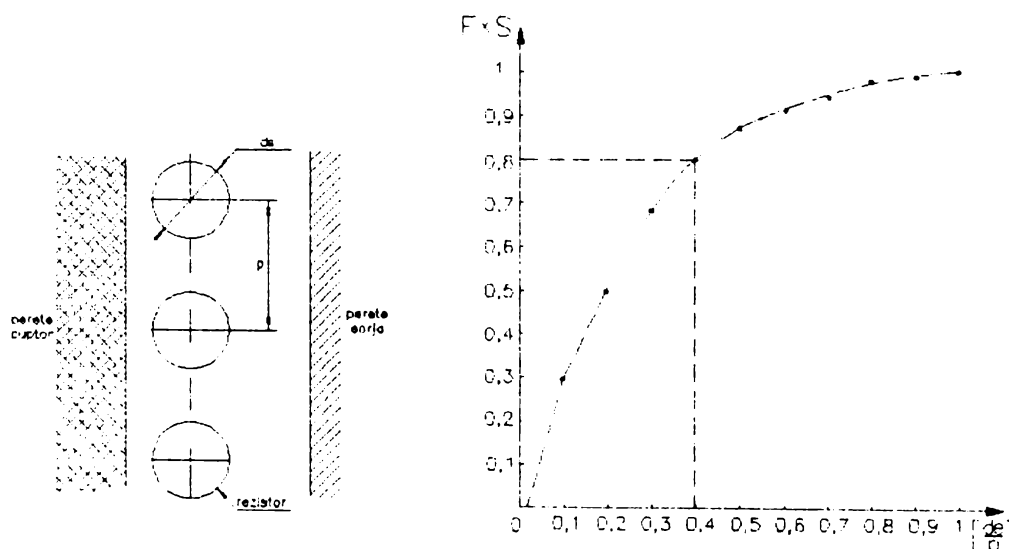


Fig.1.3. Configurarea rezistorului de tip țevă în raport cu peretele cuptorului



## b) sub aspectul duranței în funcționare

O problemă mai delicată, în construcția cuptoarelor electrice cu atmosfere controlate, o reprezintă duranța scăzută a rezistoarelor sub influența atmosferei carburante [123]. Soluția clasică prin utilizarea de tuburi radiante se dovedește inefficientă. Pe de o parte prin ecranarea rezistorului în tubul refractar de protecție se impune limitarea temperaturii maxime de tratament în cuptor pentru a asigura protecția rezistorului. Soluția ideală o constituie tot rezistorii de tip țevă (Fig.1.4).

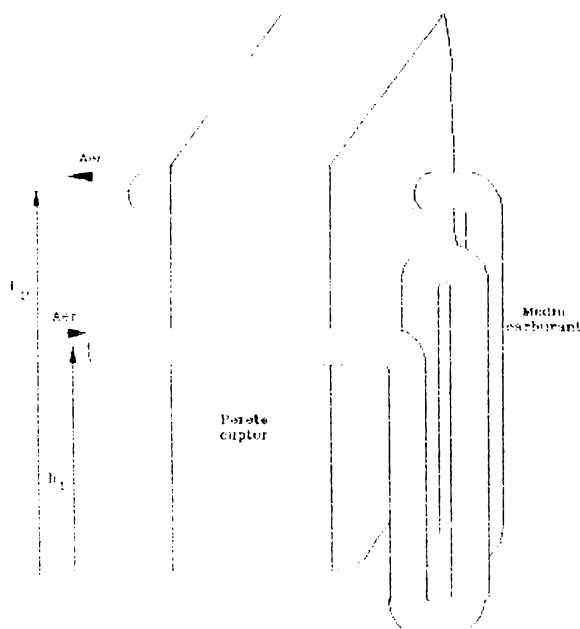


Fig.1.4 Principiul rezistorilor tip țevă în atmosfere carburante

Principiul este simplu și de eficient. Rezistorul din țevă neîntreruptă se termină la capete cu borne găurite care asigură prelevarea din atmosfera exterioară cuptorului a unei cantități de aer care este circulat prin interiorul tubului sub acțiunea diferenței de presiune hidrostatică dată de decalarea pe înălțime a poziționării celor două borne terminale ale unui element rezistiv. Prin circulația continuă a acestei cantități de aer proaspăt, cu debit redus, se asigură un proces continuu de decarburare la suprafața din interiorul tubului și care compensează efectul

carburării care are loc la suprafața exterioară a rezistorului aflată în contact direct cu atmosfera carburantă din incinta cuptorului. În acest fel structura inițială a materialului se menține nealterată iar duranța este mult mărită (până la 12-15 ori) [43].

Pentru cuptoarele care nu funcționează sub atmosfere controlate, de volume reduse unde nu pot fi amplasați rezistoare de tip masiv, dar unde se dorește creșterea densității de putere, sunt adoptate în prezent soluții de protejare a rezistorului în interiorul unui suport din fibră ceramică supusă unui tratament sub vid. Cu alte cuvinte sunt create structuri omogene de pereți radianți termoizolați [155]. Soluția este în fază de studii de optimizare constructivă.

## c) sub aspectul nivelului de automatizare

Așa cum se poate intui, elementul principal care conferă calitate unui proces tehnologic, realizat într-un cuptor este dictat de nivelul de dotare sub aspect calitativ al instalației de automatizare. Se evidențiază cele mai importante progrese realizate și implementate parțial:

- odată cu modificarea comportării dinamice a cuptoarelor, ca urmare a introducerii izolației cu fibre ceramice cu inerție termică redusă, s-a impus și recondiționarea caracteristicilor reguletoarelor de temperatură pentru a asigura

617 841  
285 17

condiții de funcționare precisă și stabilă. Soluția cea mai agreată în prezent este de promovare a noilor tipuri de *reglatoare numerice cu microprocesor, echipate cu soft propriu* de analiză a perturbațiilor, de natură internă sau externă procesului și capabile să-și poată *acorda în mod adaptiv parametrii de reglare*. Până în prezent, această cerință nu a putut fi satisfăcută decât prin import [161];

- principiul reglării adaptive implică necesitatea existenței unui element de execuție capabil de a răspunde rapid și de a realiza dozarea mărimii de comandă continuu în raport direct cu semnalul primit de la regulator. Fiind implicată puterea electrică care trebuie dozată, acest lucru se poate realiza în prezent cu ajutorul *echipamentelor electronice de putere cu tiristoare comandate în tren de undă sau cu tăiere de undă în unghi de fază*. În timp a fost reținută soluția modulării puterii prin tren de undă deoarece nu generează puteri reactive și nu produc perturbații prin armonici ca în cazul tăierii de undă [138]. Cerințele actuale sunt de a îmbunătăți funcționarea acestor echipamente prin asigurarea reglării continue a lungimii trenului de undă pentru a acorda timpul de conducție cu cerința furnizată de la regulator pentru o putere medie necesară pe o perioadă de comandă ciclică. Trebuie subliniat totodată importanța unui reglaj continuu al puterii în creșterea anduranței în funcționare a rezistoarelor [123];

- în general sistemul actual de racordare a elementelor rezistoare la instalația de alimentare cu energie electrică se realizează direct cu tensiunea rețelei de alimentare. Din mai multe considerente se impune utilizarea transformatoarelor coboritoare de tensiune între rezistoare și punctul de alimentare [84]. Sub aspectul protecției ele realizează o separație față de pământ și o reducere a tensiunii la borne și la rezistoare cu care operatorul poate veni în contact indirect, accidental. Sub aspect tehnologic în cuptoarele cu atmosferă controlată, nivelul tensiunii nu trebuie să depășească 10-30V pentru a evita crearea curenților de fugă prin intermediul funinginii depuse pe elementele din interior. Dat fiind modul general de configurare a rezistorilor doar pe pereții laterali ai camerei cuptorului, este necesară utilizarea unui tip mai special de transformator menționat anterior (de tip Scott, cu alimentare trifazată și ieșire bifazată), soluție care asigură și o reducere a necesarului de cabluri sau bare de legătură (Fig.1.5).

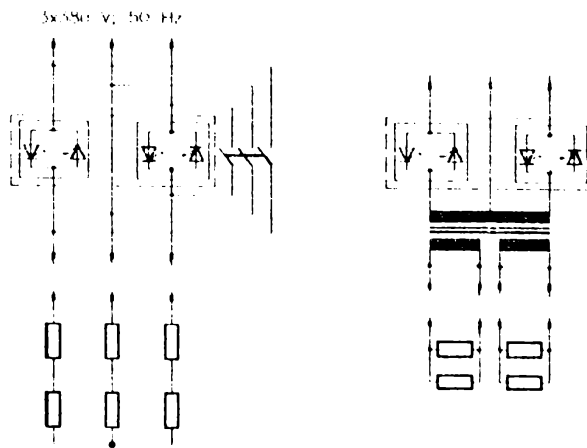


Fig.1.5. Alimentarea electrică a rezistoarelor

### I.3.3 Soluții privind informatizarea proceselor tehnologice

Aceste soluții se impun în prezent nu numai prin modernitate ci și din necesități de ordin tehnologic. Aceste necesități sunt impuse de asigurarea unui nivel superior de calitate asupra produselor.

Nu poate fi concepută realizarea unui proces tehnologic complex în condiții de asigurarea calității, cu consumuri energetice în limitele optimului fără introducerea mijloacelor de calcul. Acest aspect al procesului de re tehnologizare a fost sesizat și de unii utilizatori de cuptoare din țară. Din nefericire, atât sectorul de cercetare cât și cel de producție nu poate face față acestei cerințe formulate în ultimul timp de tot mai mulți agenți economici.

Această lipsă de participare la competiția pieței din partea agenților economici autohtoni a facilitat pătrunderea de echipamente de conducere procese de tratament termic prin structuri de hardware și software din cele mai diverse. Cea mai reprezentativă structură se referă la conducerea proceselor de tratament termochimic de cementare în mediul gazos. Calitatea acestor structuri este însă îndoielnică, în special în partea de software, deoarece ele se bazează în exclusivitate pe actualele rețete tehnologice ale utilizatorului. În plus, costul acestor structuri este inacesibil mării majorității a agenților economici din țară.

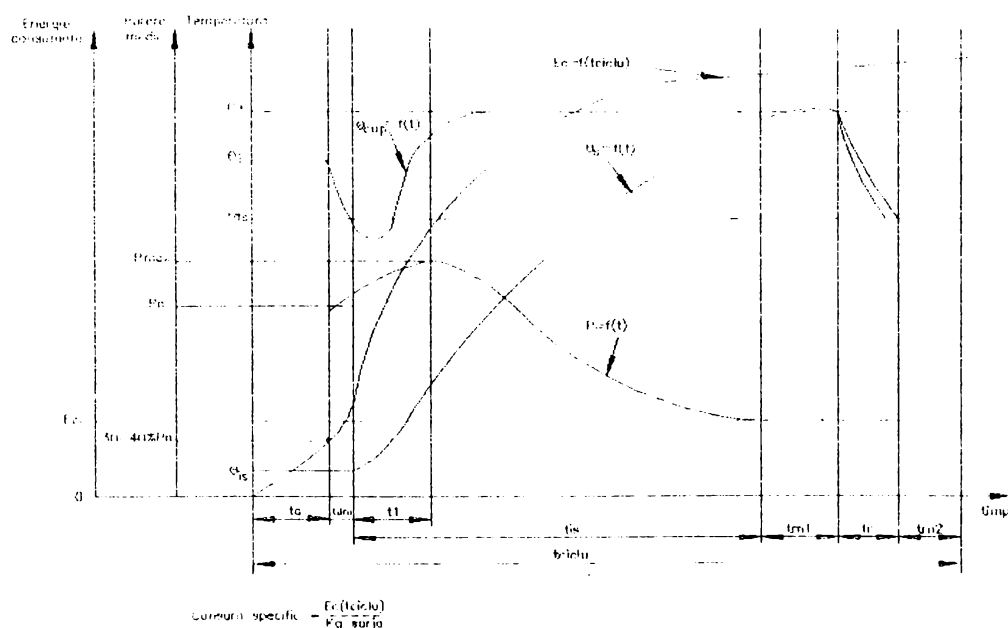


Fig.1.6 Evoluția în timp a parametrilor urmăriți prin simulare

#### I.4 CRITERII DE OPTIMIZARE CONSTRUCTIV-FUNCȚIONALĂ

În scopul realizării obiectivelor formulate în introducere, s-a stabilit o serie de criterii de bază, marcate într-un schelet organifazic conform Fig.1.7, și care reprezintă în mare structura unui program destinat testării prin modelare și simulare a performanțelor constructive și funcționale ale cuptoarelor cu încălzire electrică, precum și testării prin simulare a posibilităților de optimizare a ciclurilor tehnologice de procesare.

Explicititate, aceste criterii se pot rezuma la următoarele:

a) pentru a determina condițiile reale în care se derulează un proces tehnologic este absolut necesar *identificarea performanțelor termice și funcționale ale cuptorului*, fie prin testări experimentale fie prin testări prin modelare și simulare;

b) pentru determinarea consumurilor energetice prin funcția de variație a puterii absorbite în timp, cât și a fluxului termic incident pe suprafața șarjei este necesar *identificarea performanțelor nominale ale instalației de încălzire*, fie prin modelări, fie prin măsurători experimentale;

c) pentru determinarea cât mai exactă a modului în care are loc procesul tehnologic în piesa supusă tratamentului, pentru fiecare parametru în parte se impune ca:

- modelul de cuptor și al instalației de încălzire să preia fără deformări configurația geometrică și *elementele constructive reale*, din documentația de execuție și eventual corectate cu elemente de pe teren care modifică datele ale construcției inițiale;

- modelul de șarjă trebuie să ia în considerare *masa șarjei brute* și să mențină, sub impunerea unor criterii de similitudine, caracteristicile geometrice ale șarjei brute și caracteristicile termice ale piesei de tratat;

d) pentru determinarea cât mai exactă a elementelor de construcție a unui ciclu optim de procesare, se impune menținerea condițiilor în care are loc procesul, modul de configurare a șarjei în cuptor și modul în care se realizează reglarea parametrilor de proces;

e) optimizarea regimului de funcționare în exploatare impune realizarea unei funcții adecvate pentru reglarea mărimilor parametrilor implicați în proces și realizarea unei funcții de comandă continuă a elementului de execuție.

Aceste criterii de optimizare au fost validate prin testări experimentale pe cuptor industrial cât și prin simulări.

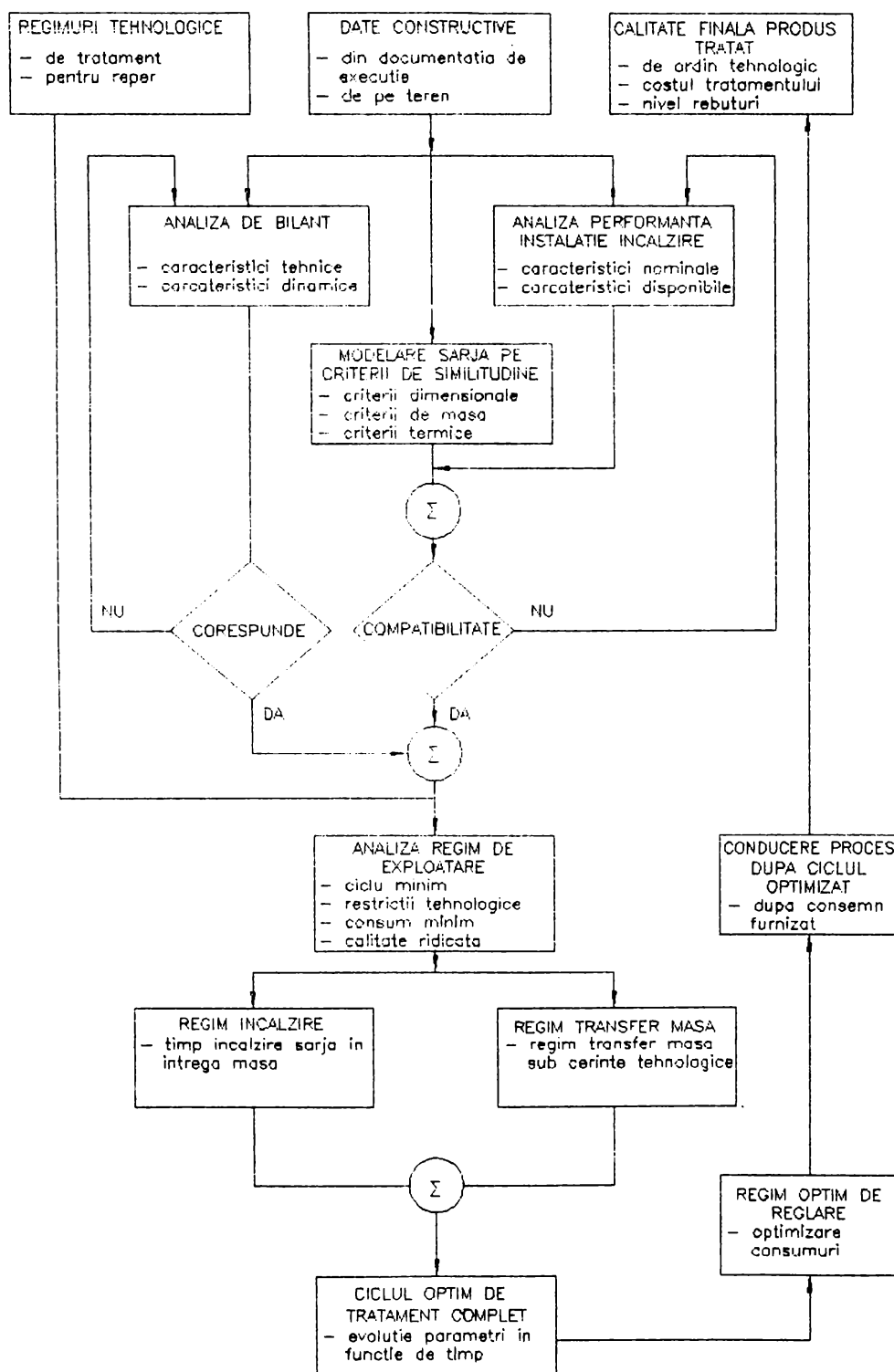


Fig.1.7 Organizarea criteriilor de optimizare constructiv-funcțională

## CAP. II FUNDAMENTAREA TEORETICĂ A LUCRĂRII

### II.1. FENOMENE TERMOFIZICE ȘI TERMOCHIMICE ÎN CUPTOARE ELECTRICE INDUSTRIALE DE TEMPERATURI RIDICATE

#### II.1.1 Fenomene termofizice

În cuptoarele electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare se întâlnesc toate cele trei moduri ale transferului termic. Modurile de bază ale transferului termic în cuptoarele cu rezistoare sunt cele prin *conducție termică* și *radiație termică*. Modul de transfer termic prin *convecție* nu poate fi tratat practic ca un mecanism separat în cazul cuptoarelor, în raport cu celelalte două menționate anterior.

*Conducția termică* care propagă căldura dintr-o parte a unui corp cu o temperatură mai ridicată spre o altă parte a aceluiași corp, sau a altui corp cu care se află în contact direct, cu o temperatură mai redusă este evidențiată într-un cuptor cu rezistoare la trecerea căldurii prin pereții izolatori ai cuptorului, prin elementele rezistive, prin accesorii și prin piesele și dispozitivele care constituie șarja de încălzit.

*Radiația termică*, spre deosebire de conducția termică, nu necesită existența unui mediu material de propagare, ci din contră ea este mult mai eficientă cu cât vidul este mai înaintat. Ea reprezintă o parte a radiației electromagnetice emisă de către un corp aflat la o anumită temperatură și asigură schimbul de căldură între diferitele suprafețe din interiorul cuptorului, precum și dintre pereții exteriori și mediul ambiant al cuptorului.

În majoritatea cazurilor atmosferele de tratament utilizate nu participă la schimbul termic prin absorbție și emisie, deoarece ele pot fi considerate ca medii perfect *transparente*. Această considerație se bazează pe faptul că unele componente gazoase cu structură moleculară simetric nepolară ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ) sunt transparente prin natura lor, iar componentele puternic absorbante și radiante ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ) sunt controlate și reglate în incinta cuptorului la nivele foarte reduse (sub 1%) [75].

Pe de altă parte, suprafețele din interiorul cuptorului nu sunt suficient de prelucrate pentru a fi considerate *oglinzi* și ca urmare emit radiație după o direcție proporțională cu cosinusul unghiului format de direcția de emisie și normala la suprafața de emisie [65]. Materialele refractare de izolare, rezistoarele și accesoriiile sunt deasemeni suficient de *rugose* fiind caracterizate printr-o o radiație emisă sau reflectată repetat în mod *difuz* [65,101]. La fel se comportă și piesele de tratat care pe lângă starea de prelucrare pot prezenta și oxidări de suprafață, în cazul tratamentului termic în aer. Ipoteza radiației difuze prezintă avantajul reducerii complexității de reprezentare a fenomenului fizic.

Toate suprafețele reale din cuptor care participă la schimbul termic prin radiație sunt presupuse emițătoare sau absorbante la radiație în mod identic, independent de lungimea de undă și se numesc suprafețe *gri* [65]. Această ipoteză crează o dificultate prin faptul că impune obținerea de date spectrale pentru toate materialele implicate. Emisivitatea totală a acestora, respectiv media pe întreg spectrul de radiație este dificil de determinat cu certitudine [65,101].

O altă ipoteză luată în considerare la schimbul termic prin radiație, în

cuptoarele electrice cu rezistoare, se referă la suprafețele de izolare termică presupuse *opace și izoterme* [65,75].

Schimbul termic prin radiație reprezintă *modul preponderent* de transfer termic în cuptoarele cu încălzire indirectă prin rezistoare, mai ales în cazul temperaturilor ridicate de tratament sau în cazul cuptoarelor cu mare densitate de putere.

*Convecția naturală*, datorată mișcării fluidului ca rezultat al diferenței de densitate produsă de însuși transferul termic. Ea contribuie la transferul indirect a căldurii de la suprafețe mai calde la medii mai reci, iar împreună cu radiația participă la evacuarea pierderilor prin pereți spre mediul ambiant al cuptorului. Spre deosebire de transferul termic prin radiație, convecția termică are o anumită importanță la schimbul termic de suprafață doar la *începutul ciclului de încălzire*, atunci când șarja este rece. Pe măsură ce șarja se încălzește la suprafață aportul convecției termice devine nesemnificativ [75,96].

*Conducția electrică* în rezistoare este influențată de rezistivitatea electrică a materialului din care este confecționat rezistorul și de temperatura acestuia. În cuptoarele care funcționează cu atmosfere carburante ce vin în contact direct cu rezistorul, conductivitatea electrică poate fi influențată cu timpul de evoluția caracteristicilor de material datorită modificării conținutului de carbon al acestuia [46]. În general, în condițiile uzuale de alimentare electrică (50,60 Hz), efectul pelicular în rezistoare poate fi neglijat [96].

## II.1.2 Fenomene termochimice

Utilizarea tehnologică cea mai răspândită a cuptoarelor electrice cu rezistoare este cea destinată *tratamentului termochimic de cementare*, prin călire în ulei a pieselor supuse anterior unui proces de carburare în mediu gazos sub un conținut controlat și reglat de carbon. Scopul tehnologic este de a crește conținutul inițial de carbon până la un anumit procent specificat la suprafață și cu o anumită distribuție în material pe o adâncime specificată. În finalul procesării termochimice se obține prin călire o distribuție dorită a durității pe o anumită adâncime în strat măsurată de la suprafață piesei.

În această aplicație tehnologică sunt implicate două moduri ale transferului de masă, *conducția sau difuzia componentei masice* în mediul solid al materialului de tratat și *transferul de masă* din mediul cuptorului spre suprafața piesei.

*Difuzia carbonului în material* se datorește diferenței de concentrație între o parte cu o concentrație mai ridicată și alte părți din material cu concentrație mai redusă în carbon, fiind puternic influențată de temperatura acestora. Procesul de difuzie trebuie controlat într-o interdependență a gradientului de concentrație cu coeficientul de difuzie, puternic dependent de concentrație și de temperatura materialului.

*Transferul de masă la suprafață* este similar convecției termice și depinde de diferența potențialului de carbon dintre atmosfera cuptorului și nivelul concentrației la suprafața piesei de tratat, precum și de viteza cu care fluidul tehnologic este recirculat.

## II.2 MECANISMELE TRANSFERULUI TERMIC ȘI DE MASĂ ÎN CUPTOARE ELECTRICE

### II.2.1 Ecuația de bilanț energetic

Analiza a transferului termic în orice *sistem închis* utilizează ecuația de bilanț energetic ce satisface principiul conservării energiei:

$$\frac{dE_i}{dt} + \frac{dE_g}{dt} = \frac{dE_e}{dt} + \frac{dE_a}{dt} \quad (2.1)$$

- $dE_i/dt$  - energia care intră în sistem în unitatea de timp;
- $dE_g/dt$  - energia generată în interiorul sistemului în unitatea de timp;
- $dE_e/dt$  - energia care iese din sistem în unitatea de timp;
- $dE_a/dt$  - energia acumulată sistem în unitatea de timp.

### II.2.2 Discretizarea ecuației căldurii

Ecuația conductivității termice într-un mediu material de conductivitate termică  $\lambda$ , de masă volumică  $\gamma$  și de căldură masică  $c$  are expresia [101]:

$$\text{div}(-\lambda \text{ grad } T) + \gamma c \frac{dT}{dt} = P \quad (2.1)$$

unde  $P$  reprezintă *puterea volumică disipată* în material.

Integrând această ecuație pe un volum elementar "i", înconjurat de vecinătățile "j", se obține forma discretizată, care reprezintă bilanțul termic al volumului elementar " $V_i$ ":

Căldura acumulată în elementul "i" în unitatea de timp = Căldura produsă în elementul "i" + Schimbul termic între elementul "i" și elementele vecine "j"

$$C_i \frac{d\theta_i}{dt} = \Phi_i + \sum_j G_{ij} (\theta_i - \theta_j) \quad (2.2)$$

unde:

- $G_{ij}$  - *conductanța termică* între elementele "i" și "j" [W/K];
- $C_i = \gamma_i c_i V_i$  - *capacitatea termică* a elementului "i", respectiv cantitatea de căldură înmagazinată când temperatura sa crește cu un grad [Wh/K];
- $\Phi_i = P_i V_i$  - *puterea produsă* de elementul "i" [W].

Pentru reprezentarea în formă discretă a ecuațiilor de transfer termic în lucrare va fi utilizată *analogia electrică* prin conductanțe și capacități.

*Nodul termic* se identifică geometric cu elementul, a cărei masă materială este concentrată în centrul de greutate a elementului. În cazul reprezentării plane acest nod este intersecția mediatoarelor laturilor elementului geometric. Alegerea mediatoarelor permite generarea unei rețele de conductanțe termice exacte. Pe de altă parte gradientul de temperatură generat prin diferența de temperatură dintre centrul nodului și mijlocul laturii de frontieră este întotdeauna perpendicular pe latura de frontieră ce separă două elemente



*Bilanțul termic*, considerat în nodul termic, corespunde de fapt bilanțului asupra elementului incremental în ansamblul lui, iar metoda astfel utilizată este o *metodă nodală care conservă energia termică*.

Nodurilor termice sunt legate între ele prin *conductanțe* ce pot fi de natură *conductivă, convectivă sau radiantă*.

*Sursele de căldură* sunt localizate în nodul termic, iar pentru analiza transferului termic în regim tranzitoriu sunt considerate ca localizate deasemeni în nodul termic capacitățile termice concentrte.

Poziționarea nodului termic este funcție de forma geometrică a elementului, fapt ce poate constitui un inconvenient în cazul în care elementul este un triunghi dreptunghic (nodul termic va fi distribuit pe ipotenuză), sau pentru cazul triunghiurilor obtuze (nodul termic distribuit în afara elementului). În lucrare s-au utilizat elemente de tip triunghi echilateral (Fig.2.1).

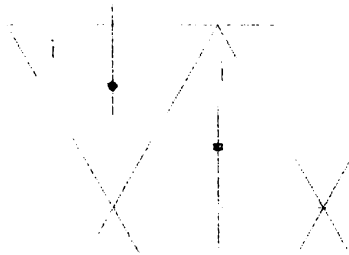


Fig.2.1 Poziționarea nodului termic în cazul discretizării plane prin elemente triunghiulare.

### II.2.2.1 Transfer termic conductiv

Conductanțele se calculează între noduri învecinate care au o frontieră comună (Fig.2.2). Pentru fiecare nod sunt explicitate conductanțele dintre centru și frontiera considerată:

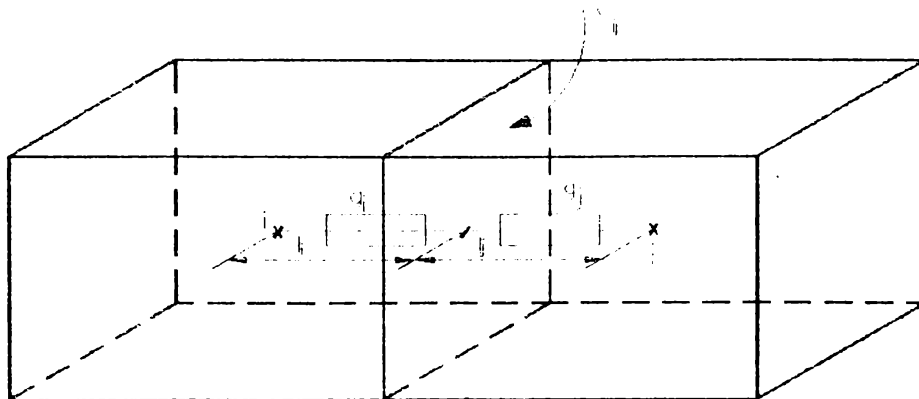


Fig.2.2 Reprezentarea conductanțelor conductive

$$\frac{1}{G_{ij}} = \frac{l_i}{\lambda_1 S_{ij}} + \frac{l_j}{\lambda_j S_{ij}} = \frac{1}{g_i} + \frac{1}{g_j}$$

unde  $G_{ij}$  - conductanța între centrele elementelor "i" și "j" [W/K];

- $g_i, g_j$  - conductanțe termice între centrele nodale și frontiera de separație între două elemente învecinate [W/K];  
 $l_i, l_j$  - distanța dintre nodurile elementelor "i", "j" și frontiera comună [m];  
 $\lambda_i, \lambda_j$  - conductivități termice ale nodurilor elementelor "i" și "j" [W/mK];  
 $S_{ij}$  - suprafața de separație între două elemente învecinate [m<sup>2</sup>].

### II.2.2.2 Schimb termic prin radiație

Schimbul termic preponderent în cuptoarele electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare, cu temperaturi de lucru și densități de putere ridicate, este cel prin radiație. Sistemele rezistive aduse la temperaturi de 950–1200°C pot fi asimilate perfect cu emițătoarele în spectru de radiații în infraroșu.

Pe de altă parte, în lucrare sunt tratate procesări termice asupra unor șarje constituită din piese termic subțiri care schimbă energie termică preponderent prin radiație atât cu suprafețele din interiorul cuptorului cât și cu suprafețele pieselor din vecinătatea lor.

Din aceste considerente în acest paragraf se tratează mai în detaliu probleme legate de specificul transferului termic prin radiație.

*Nodurile termice* sunt considerate de suprafață, fapt pentru care în tratarea schimbului termic prin radiație în cuptoare se formulează următoarele ipoteze:

- *incinta cuptorului este închisă*, constituită din suprafețe elementare izoterme, presupuse opace, respectiv cu emisie limitată la o zonă din vecinătatea peretelui și cu grosime suficient de redusă pentru a putea fi asimilată cu o suprafață geometrică [98];

- toate *suprafețele sunt gri*, respectiv emisivitatea lor este independentă de lungimea de undă [98];

- aceste suprafețe sunt sediul unor *emisii și reflexii difuze*, conform legii lui Lambert [64];

- *mediul din incintă este perfect transparent* și nu participă la schimbul termic prin radiație.

Schimbului termic prin radiație se tratează sub următoarele trei aspecte: schimbul termic exclusiv între două suprafețe, schimbul termic între mai mult de două suprafețe și determinarea factorilor de vedere geometrici.

#### 1\*) Schimbul termic prin radiație între două suprafețe

În analiza termodinamică *densitatea de energie* reprezintă energia radiată de la o suprafață în unitatea de timp și de pe unitatea de suprafață. Stefan și Boltzmann au stabilit *legea schimbului net de energie termică prin radiație între două corpuri negre*:

$$\Phi_{ij} = \sigma S_i (T_i^4 - T_j^4) \quad [\text{W}] \quad (2.3)$$

unde

- $\sigma$  = 5,67x10<sup>-8</sup> [W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>], reprezentând constanta Stefan-Boltzmann;
- $T_i, T_j$  - temperaturile corpurilor care schimbă energie termică între ele [K]

Încălzirea unui corp depinde de forma acestuia, de proprietățile sale de emisie și absorbție a radiației termice. Astfel ecuația de transfer termic prin

radiație între două suprafețe reale gri-difuze capătă forma:

$$\Phi_{ij} = \sigma F(\epsilon) S_i F_{i-j} (T_i^4 - T_j^4) \quad [W] \quad (2.4)$$

unde:

- $\Phi_{ij}$  - fluxul termic net între două suprafețe de arie  $S_i$  și  $S_j$ , în unitatea de timp;
- $T_i$  - temperatura corpului emițător [K];
- $T_j$  - temperatura corpului receptor [K];
- $F(\epsilon)$  - funcție care depinde de factorii de emisie  $\epsilon_i$  și  $\epsilon_j$  ai celor două suprafețe materiale ce schimbă energie prin radiație termică. Acest factor ține cont de faptul că suprafețele reale nu sunt corpuri negre, ci corpuri gri, respectiv nu toată energia incidentă va fi absorbită, ci o parte va fi reflectată către alte suprafețe sau în afara sistemului. În plus, fenomenul de reflectivitate între suprafețe va putea avea loc de mai multe ori repetat în ambele direcții. Acest factor este datorat naturii suprafața ce poate fi asimilat printr-o rezistență termică de suprafață [75].
- $F_{i-j}$  - factorul de formă geometric (de vedere) al corpului "i" în raport cu corpul "j" consideră faptul că numai o parte din radiația emisă de corpul "i" va fi receptată de corpul "j". Acest factor este datorat orientării suprafeței și poate fi asimilat printr-o rezistență termică spațială [75].

Acești factori pot fi cuplați într-o formă de interdependență, cu ajutorul factorilor de formă gri  $F_{fg}$ , ce semnifică faptul că partea din fluxul de căldură care părăsește suprafața elementului "i" și este absorbit de elementul "j" după mai multe reflexii difuze pe alte noduri ale domeniului de transfer [98].

$$F_{fg} = \overline{F(\epsilon) F_{i-j}} = f(F_{i-j}, f(\epsilon_i, \epsilon_j), \overline{S_i}, \overline{S_j}) \quad (2.5)$$

În calculele practice se utilizează conceptul de emisivitate corectată a unui sistem de corpuri care ia în considerare absorbția incompletă a energiei radiate de corpurile gri și fluxurile reflectate [101].

$$\Phi_{ij} = \sigma F(\epsilon_c) \rho F_{i-j} (T_i^4 - T_j^4) \quad (2.6)$$

unde  $\rho$  - factor de reflectivitate;

Deoarece la suprafața unui corp supusă unui flux radiant are loc, pe lângă reflexie și un fenomen de absorbție și de transivitate, se poate scrie următoarea relație între coeficienții de pondere a divizării fluxului incident pe acea suprafață:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

unde:

- $\alpha$  - factor de absorbție;
- $\tau$  - factor de transmisie.

În cazul corpurilor opace întreaga energie este reflectată fapt pentru care:

$\rho + \alpha = 1$   
 respectiv, conform legii lui Kirchhoff:  
 $\rho = 1 - \alpha = 1 - \epsilon$

În Fig.2.3 este reprezentată schema fluxurilor implicate în schimbul termic prin radiație la suprafața unui corp.

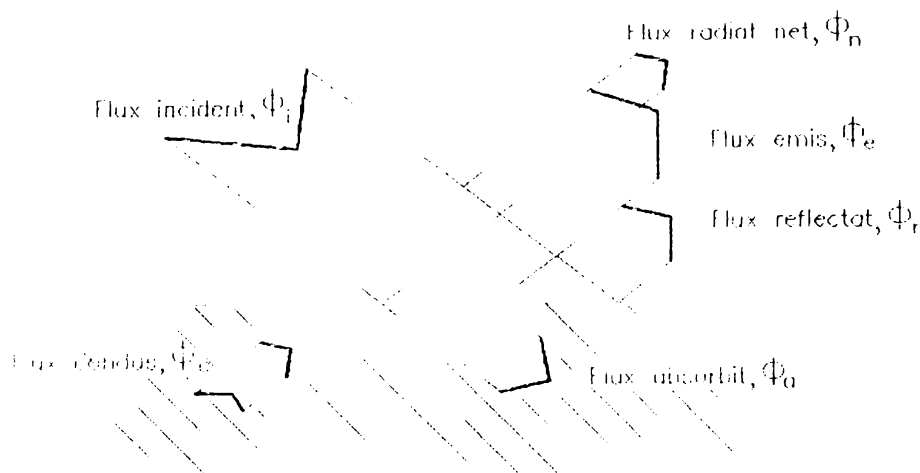


Fig.2.3 Fluxuri implicate în schimbul termic de suprafață prin radiație

unde:

- $\Phi_i$  - este fluxul emis de toate suprafețele din incintă ce vine în contact direct cu suprafața considerată sau după una sau mai multe reflexii multiple;
- $\Phi_a$  - este fluxul absorbit la suprafață ( $\Phi_a = \epsilon \Phi_i$ );
- $\Phi_r$  - este fluxul reflectat de suprafață ( $\Phi_r = (1 - \epsilon) \Phi_i$ );
- $\Phi_e$  - este fluxul emis la suprafață datorită temperaturii corpului  
 $(\Phi_e = \epsilon \sigma ST^4)$ ;
- $\Phi_n$  - este fluxul net radiat, respectiv pierderea efectivă prin radiație la suprafață  
 $(\Phi_n = \Phi_e - \Phi_a)$ .

În cazul *corpurile opace-gri*, factorul de absorbție depinde de compoziția spectrală a fluxului incident.

2\*) Schimbul termic prin radiație simultan între mai multe suprafețe

În cazul cuptoarelor constituite din incinte închise, de forme geometrice diverse în ale căror spații de lucru sunt amplasate șarje de forme și configurații diferite, suprafețele care schimbă energie prin radiație termică sunt mai mult de două; schimbul termic realizându-se atât prin radiație directă cât și indirectă prin reflexiile acestor suprafețe. Analiza transferului termic în această situație se face considerând noțiunea de *radianță energetică a fiecărei suprafețe*. Analiza impune presupunerea că toate suprafețele considerate sunt

*gri-difuze, uniforme în temperatură iar proprietățile de emisivitate și reflectivitate sunt constante pe toată suprafața.*

Se definesc astfel două noțiuni:

- I - iradierea, respectiv radiația totală incidentă în unitatea de timp și pe unitatea de suprafață [ $W/m^2$ ];
- B - radianța energetică, respectiv radiația totală emisă în unitatea de timp și pe unitatea de suprafață [ $W/m^2$ ].

Din motive de simplificare a calculelor se presupune că atât radianța energetică cât și iradierea sunt *uniforme pe toată suprafața*, lucru care poate introduce o oarecare eroare prin faptul că suprafețele gri-difuze nu se supun strict acestei condiții.

Astfel, pentru o suprafață materială oarecare "i", se scrie un bilanț energetic:

$$\text{radianța energetică} = \text{energia emisă} + \sum \text{radiațiilor reflectate}$$

Se obține:

$$B_i = \epsilon_i E_{ni} + \rho_i I_i = \epsilon_i E_{ni} + (1 - \epsilon_i) I_i \quad [W/m^2] \quad (2.7)$$

*Fluxul net de energie radiantă care pleacă de la o suprafață "S<sub>i</sub>" este:*

$$\Phi_i = (B_i - I_i) S_i = \frac{\epsilon_i S_i}{1 - \epsilon_i} (E_{ni} - B_i) \quad [W] \quad (2.8)$$

și exprimă viteza transferului termic de la suprafața "S<sub>i</sub>".

Considerând schimbul de energie între două suprafețe S<sub>i</sub> și S<sub>j</sub>, atunci:

- B<sub>i</sub> S<sub>i</sub> F<sub>i-j</sub> - cantitatea din energia radiantă totală care pleacă de la suprafața S<sub>i</sub> și care ajunge la suprafața S<sub>j</sub>;
- B<sub>j</sub> S<sub>j</sub> F<sub>j-i</sub> - cantitatea din energia radiantă totală care pleacă de la suprafața S<sub>j</sub> și care ajunge la suprafața S<sub>i</sub>.

*Schimbul net de energie între cele două suprafețe este [75]:*

$$\Phi_{i-j} = B_i S_i F_{i-j} - B_j S_j F_{j-i} = S_i F_{i-j} (B_i - B_j) \quad [W] \quad (2.9)$$

Considerând că suprafața "i" radiază către suprafața "j", *iradierea totală* este suma tuturor iradierilor I<sub>j</sub> de la celelalte "j" suprafețe:

$$\phi_i = \epsilon_i S_i (E_{ni} - \sum_j I_j) \quad (2.10)$$

$$\text{Întrucât iradierea poate fi exprimată ca} \quad S_j B_j F_{j-i} = I_j S_i \quad (2.11)$$

$$\text{și ținând cont de } \textit{proprietatea de reciprocitate}: \quad S_j F_{j-i} = S_i F_{i-j} \quad (2.12)$$

$$\Phi_i = \epsilon_i S_i (E_{ni} - \sum_j F_{i-j} B_j) = S_i B_i - \sum_j F_{i-j} B_j \quad (2.13)$$

de unde:

$$B_i = (1 - \epsilon_i) \sum_j F_{i-j} B_j + \epsilon_i E_{ni} \quad (2.14)$$

În acest caz, ținând cont de faptul că:

$$\phi_{ij} = S_i F_{ij} B_i - S_j F_{ji} B_j = S_i F_{i-j} (B_i - B_j) \quad [W] \quad (2.15)$$

se poate defini:

$G_{ij}(fg) = S_i F_{i-j}$ , ca o *conductanță de formă geometrică* la schimbul termic radiant [75].

Pe de altă parte, *fluxul net radiant* de la o suprafață radiantă "i" este:

$$\phi_i = \frac{\epsilon_i S_i}{1 - \epsilon_i} (E_{ni} - B_i) \quad [W] \quad (2.16)$$

se poate defini:

$G_{is}(fs) = \frac{\epsilon_i S_i}{1 - \epsilon_i}$ , ca o *conductanță de suprafață* la schimbul termic radiant [75]

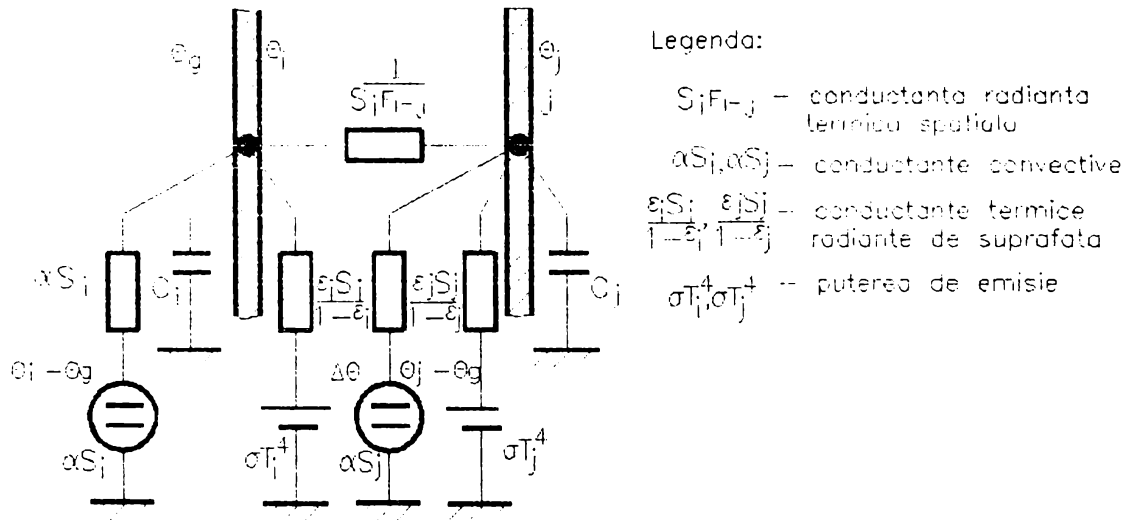


Fig.2.4 Reprezentarea analogică la schimbul termic prin radiație

În acest caz ecuația explicită pentru schimbul termic prin radiație între mai multe suprafețe devine:

$$B_i = (1 - \epsilon_i) \sum_j F_{ij} B_j + \epsilon_i E_{ni} = \frac{1 - \epsilon_i}{S_i} \sum_j S_i F_{ij} B_j + \epsilon_i S_i E_{ni} = \frac{1 - \epsilon_i}{S_i} \sum_j G_{ij} B_j + (1 - \epsilon_i) G_{is} E_{ni} \quad (2.17)$$

3\*) Determinarea factorilor de vedere

Fluxul net emis de la suprafața "i" către suprafața "j" este:

$$d\Phi_i = \frac{\sigma T_i^4}{\pi r^2} \cos\psi_i \cos\psi_j ds_i ds_j \quad (2.18)$$

iar de la suprafața "j" la suprafața "i" este:

$$d\Phi_j = \frac{\sigma T_j^4}{\pi r^2} \cos\psi_i \cos\psi_j ds_i ds_j \quad (2.19)$$

Fluxul net între cele două suprafețe "i" și "j" este:

$$d\Phi_{ij} = d\Phi_i - d\Phi_j = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4) \cos\Phi_i \cos\Phi_j ds_i ds_j}{\pi r^2} \quad (2.20)$$

Integrând:

$$\int d\Phi_{ij} = \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\pi} \iint_{s_i, s_j} \frac{\cos\Phi_i \cos\Phi_j ds_i ds_j}{r^2} \quad (2.21)$$

Se obține:

$$S_i F_{i \rightarrow j} \sigma(T_i^4 - T_j^4) = - \frac{\sigma(T_i^4 - T_j^4)}{\pi} \iint_{s_i, s_j} \frac{\cos\psi_i \cos\psi_j ds_i ds_j}{r^2} \quad (2.22)$$

Se definește ca *funcția termică de schimb termic* produsul:

$$S_i F_{i \rightarrow j} = \frac{1}{\pi} \iint_{s_i, s_j} \frac{\cos\psi_i \cos\psi_j ds_i ds_j}{r^2} \quad (2.23)$$

Printr-o analiză inversă a radiației unei suprafețe  $S_j$  spre o suprafață  $S_i$  se determină în mod similar:

$$S_j F_{j \rightarrow i} = \frac{1}{\pi} \iint_{s_i, s_j} \frac{\cos\psi_i \cos\psi_j ds_i ds_j}{r^2} \quad (2.24)$$

Rezultă *proprietatea de reciprocitate* :

$$S_i F_{i \rightarrow j} = S_j F_{j \rightarrow i}$$

care semnifică faptul că funcția termică de transfer prin radiație este aceeași indiferent de forma și amplasarea corpurilor.

Într-un sistem împrejmuit de corpuri și medii radiante, fluxul termic emis prin radiație de unul dintre corpuri către toate celelalte este egal cu radiația corpului implicat:

$$\Phi_i = \sum_{j=1}^n \Phi_{ji} = \sum_{j=1}^n \Phi_i F_{i \rightarrow j} \quad (2.25)$$

Din aceasta se obține următoarea relație de control:

$$\sum_{j=1}^n F_{i \rightarrow j} = 1, \quad \text{unde: } F_{i \rightarrow j} \in [0, 1] \quad (2.26)$$

Pentru cazul unor suprafețe aranjate în configurații geometrice simple, literatura de specialitate prezintă formule simplificatoare de calcul a factorilor de formă geometrici [1,80].

Pentru configurații mai complexe, sau pentru determinări mai precise, este necesar a se realiza un calcul al *integralei duble de suprafață* [Fig 2.5]:

$$F_{i-j} = \frac{1}{S_i S_j} \iint \frac{\cos \psi_i \cos \psi_j}{\pi r^2} ds_i ds_j \quad (2.27)$$

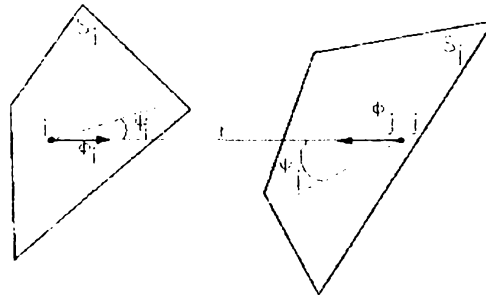


Fig 2.5 Determinarea factorilor de vedere prin integrală dublă de suprafață

Sparrow [2,3] a demonstrat, pornind de la formula lui Green-Gauss[106] de transformare a unei integrale duble de suprafață într-o integrală simplă de contur, că factorii de vedere geometrice pot fi determinați cu ajutorul unei *integrale duble de contur* [101] [Fig 2.6]:

$$F_{i-j} = \frac{1}{2 \pi S_i} \int \int_{C_i, C_j} \ln(r) dr_i dr_j \quad (2.28)$$

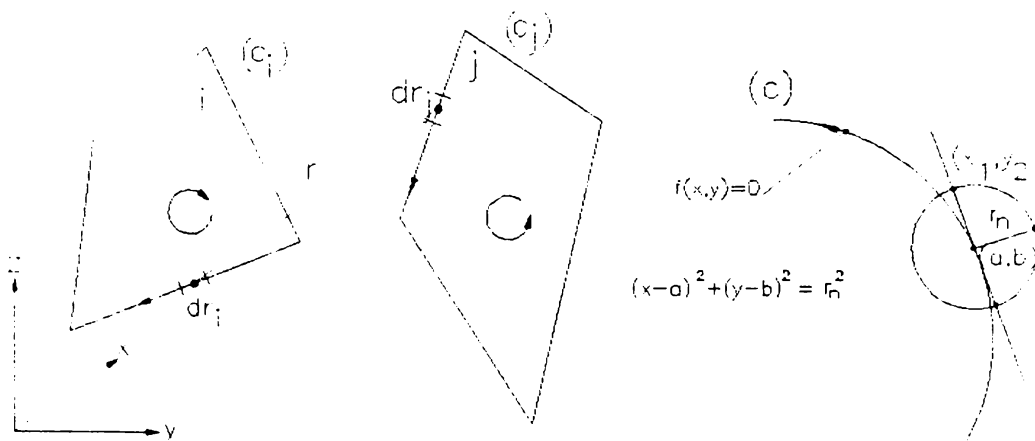


Fig 2.6 Determinarea factorilor de vedere prin integrală dublă de contur

unde:

- $C_i, C_j$  - reprezintă contururile care mărginesc suprafețele  $S_i$  și  $S_j$ ;
- $dr_i, dr_j$  - reprezintă lungimile elementare pe contururile  $C_i$  și respectiv  $C_j$ ;
- $r$  - distanța dintre lungimile elementare  $dr_i$  și  $dr_j$ .



Metoda adoptată pentru determinarea factorilor de vedere, este binecunoscuta metodă **Romberg**, care constă în obținerea unei aproximări a valorii unei integrale la *limita unui pas de timp care tinde spre zero*. În calculele adoptate, procedura constă în esență în realizarea a doi pași distincți:

- în primul pas se realizează o aproximare a integralei duble de contur prin aplicarea repetată a regulii trapezului, cu lungimi ale pasului de  $h$ ,  $h/2$ ,  $h/4$ , ... , pentru fiecare segment al conturilor. Această metodă înlocuiește integrala dublă cu sumă dublă:

$$I^K = h_1 h_2 \left[ \frac{f(A,C) + f(A,D) + f(B,C) + f(B,D)}{4} + \sum_{j=1}^{2^{N-1}} \frac{f(A,C+jh_2) + f(B,C+jh_2)}{2} + \sum_{\substack{i=1 \\ \Delta j=2}}^{2^{N-1}} \frac{f(A+ih_1,C) + f(A+ih_1,B)}{2} + \sum_{\substack{i=1 \\ \Delta i=2}}^{2^{N-1}} \sum_{\substack{j=1 \\ \Delta j=2}}^{2^{N-1}} f(A+ih_1,C+jh_2) \right] \quad (2.29)$$

unde:  $A, B$  - limitele de integrare după direcția  $r_1$  (pe conturul  $C_1$ );  
 $C, D$  - limitele de integrare după direcția  $r_2$  (pe conturul  $C_2$ );  
 $h_i$  =  $(B-A)/2^i$  - pasul de integrare după conturul  $C_1$ ;  
 $h_j$  =  $(D-C)/2^j$  - pasul de integrare după conturul  $C_2$ ;  
 $k = i \times j$  - numărul de aplicări ale integralei duble;  
 $2^i = n$  - reprezintă numărul de pași sau de aplicări repetate a regulii trapezului;  
 $d\vec{r}_1, d\vec{r}_2$  - vectorii unitate de direcție, după direcția  $r_1$  pe conturul  $C_1$ , respectiv  $r_2$  pe conturul  $C_2$ ;  
 $f = 0,5 \ln[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2]$  (2.30)

$i \in [1 \dots k]$

$x_1, y_1, z_1$  - coordonatele vectorului unitar  $dr_1$ ;  
 $x_2, y_2, z_2$  - coordonatele vectorului unitar  $dr_2$ ;

- în pasul următor se realizează *extrapolarea Romberg* utilizând formula de recursivitate, care utilizează valorile  $I(n,1)$  determinate prin pasul anterior:

$$I(m,n) = I(m-1,n+1) + \frac{\{I(m-1,n+1) - I(m-1,n)\}}{4^m - 1} \quad (2.31)$$

unde  $n$  - numărul rândurilor unei matrici diagonale;  
 $m$  - numărul coloanelor matricii diagonale

În cazul suprafețelor curbe problema care se pune este de a determina valoarea optimă a incrementului de contur asimilat liniar. În acest scop este necesar este de cunoașterea ecuației și a exprimării discretizate a conturului curbat. Astfel, pentru contururi curbate, asimilabile cu un cerc centrat în punctul  $A(a,b)$ :

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = h_1^2 \quad (2.32)$$

Fie tangenta la contur în punctul de coordonate  $(a,b)$  care intersectează

cercul centrat în punctul  $(x_1, y_1)$  și fie:

$$\begin{aligned}\varphi_1 &= x_1 - a \\ \delta_1 &= y_1 - b\end{aligned}\quad (2.33)$$

Pornind de la faptul că tangenta va intersecta cercul în 2 puncte diametral opuse  $(\delta_1, \varphi_1)$ , alese în așa fel încât:

$$\nabla f \times (\delta_1 \vec{i} + \varphi_1 \vec{j}) \quad (2.34)$$

să aibă același semn, fie  $(\delta_1, \varphi_1)$  soluțiile inițiale pentru punctul de intersecție a cercului cu conturul și fie  $(\delta_2, \varphi_2)$  cea mai bună aproximare:

$$\begin{aligned}\varphi_2 &= \varphi_1 + g \\ \delta_2 &= \delta_1 + k\end{aligned}\quad (2.35)$$

în care:

$$g \ll \delta_1, \text{ respectiv } k \ll \varphi_2$$

Se obține:

$$(\delta_1 + g)^2 + (\varphi_1 + k)^2 = h_1^2 \quad (2.36)$$

care prin dezvoltare în serie Taylor, devine:

$$f(a + \delta_2, b + \varphi_2) = f_0(a, b) + \delta_2 \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(a, b)} + \varphi_2 \left. \frac{\partial f}{\partial y} \right|_{(a, b)} + \dots \quad (2.37)$$

Presupunând:  $f(a, b) = 0$ , se obține:

$$\left( g \frac{\partial f}{\partial x} + k \frac{\partial f}{\partial y} \right) \Big|_{(a, b)} = - \left( \delta_1 \frac{\partial f}{\partial x} + \varphi_1 \frac{\partial f}{\partial y} \right) \Big|_{(a, b)} \quad (2.38)$$

Rezolvând sistemul de ecuații se pot obține necunoscutele  $g$  și  $k$ , de unde se obține  $(\delta_2, \varphi_2)$ . Înlocuind pe  $(\delta_1, \varphi_1)$  cu  $(\delta_2, \varphi_2)$  se poate continua procesul până la convergență,  $(\delta_n, \varphi_n)$ , prin  $(m - 1)$  iterații, iar punctul pe contur va deveni:

$$(a + \delta_n) \text{ și } (b + \varphi_n)$$

Pentru *contururi plane care se intersectează*, pentru a evita incompatibilități matematice date de posibile situații de  $\ln(0)$  (când distanța între cei doi incremenți de contur este nulă), pentru aceste părți din contur se aplică formula:

$$\epsilon = -\frac{1}{2\pi S_1} \int_{r_1=0}^L \int_{r_2=0}^L |r_2 - r_1| dr_1 dr_2 = -\frac{1}{2\pi S_1} L^2 [\ln(L) - 1,5] \quad (2.39)$$

care se va adăuga la suma factorilor de vedere calculați pentru celelalte funcții.

Matricea factorilor de vedere va fi completată cu valori ale factorilor de vedere ce nu se calculează prin integrare, utilizând formula de reciprocitate:

$$F_{i-j} S_i = F_{j-i} S_j \quad (2.40)$$

Pentru cazul *peretilor echipați cu rezistori* se poate admite cu aproximare că părți din fluxul emis de rezistori, care ajunge la șarjă, după reflexii ale peretelui refractar, face să apară un factor de formă ca produs a doi factori:

$$F_{R-S} = F_{R-P} F_{P-S} \quad (2.41)$$

unde:

$F_{R-P}$  - factorul de vedere între rezistor și perete;

$F_{R-S}$  - factorul de vedere între suprafața peretelui și cea a șarjei,

calculată prin metoda de integrare.

Rezultă factorul de vedere între două elemente rezistive învecinate:

$$F_{R-R} = 1 - F_{R-P} F_{P-R} \quad (2.42)$$

Pentru calculul factorului de vedere între rezistor și perete se utilizează metoda liniilor încrucișate pentru aproximarea integralelor (Fig.2.7):

$$F_{1-j} = \lim_{\substack{c_1 \rightarrow \infty \\ c_j \rightarrow \infty}} \frac{C_j \widehat{A_3 A_1} + C_i \widehat{A_3 A_2} - C_j \widehat{B_4 B_2 A_2} - C_i \widehat{B_2 B_1 A_2}}{2 S_1} \quad (2.43)$$

care conduce la formula de calcul între elementul încălzitor și perete [64]:

$$F_{VRP} = \frac{p}{\pi d_o} \left[ 1 + \frac{d_o}{p} \left( \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{d_o}{p} \right) - \sqrt{1 + \left( \frac{d_o}{p} \right)^2} \right] \quad (2.44)$$

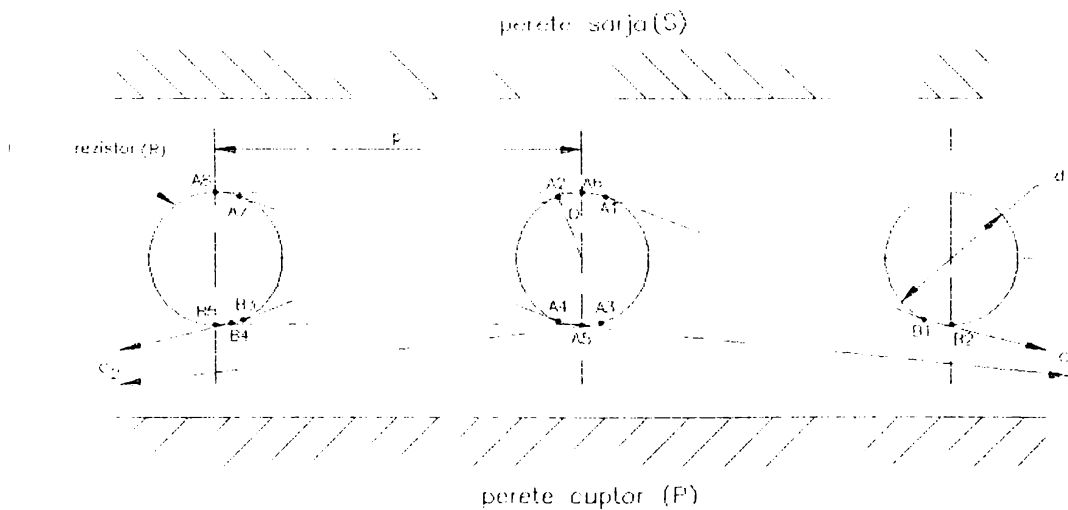


Fig.2.7 Metoda liniilor încrucișate pentru determinarea factorului de vedere între rezistor și peretele cuptorului.

### II.2.2.3 Schimb termic convectiv

Efectul convecției este luat în considerare atunci când rezistoarele sunt la temperaturi relativ scăzute, situație care este în general de scurtă durată. În general constructorii de cuptoare electrice destinate tratamentelor termochimice sub atmosfere protectoare echează cuptoarele cu *agitatoare acționate electric*, în scopul uniformizării distribuției atmosferei din incinta cuptorului. Aceste dispozitive de antrenare mecanică a gazelor din cuptor, în corelație cu crearea unei anumite suprapresiuni în cuptor, îmbunătățesc într-o anumită măsură schimbul termic prin convecție în special la suprafața șarjei, însă determinarea cu precizie a coeficientului de schimb termic prin convecție la suprafața de schimb rămâne o sarcină extrem de dificilă. Această dificultate se datorează în

cea mai mare parte necunoașterii vitezei cu care fluidul parcurge diferite zone din cuptor precum și variației rezistenței termohidraulice pe care o introduce șarja prin modul ei de configurare și distribuție. Studiile de laborator au arătat că neglijarea convecției la schimbul termic care are loc în cuptoarele cu temperaturi peste 800°C nu produce erori semnificative de calcul, deoarece peste această temperatură ponderea schimbului termic prin radiație este de peste 90%. Pe de altă parte eficacitatea schimbului termic convectiv se reduce la temperaturi ridicate datorită scăderii vâscozității gazelor din incinta cuptorului.

În lucrare a fost totuși luat în considerare schimbul termic prin convecție la suprafața șarjei și la suprafața tecii termocuplului de măsură a temperaturii din incinta de tratament.

Coeficientul de transfer termic prin convecție, provine din ecuația de transfer prin convecție:

$$\Phi_{cv} = \alpha_c S (\theta - \theta_c) \quad (2.43)$$

unde:

$$G_{n-cv} = \alpha_c S_n \quad [W/^\circ C] \quad (2.44)$$

este asimilată unei *conductanțe convective*.

Această formulă este valabilă pentru schimbul de căldură convectiv între un perete plan spălat de un fluid.

## II.2.3 Transfer de masă din mediul gazos în mediul solid

### a) Legile transferului de masă

Legile care stabilesc transferul de masă la suprafața și al difuziei în material sunt cele stabilite de Fick [147].

Conform primei legi, fluxul masic depinde de *gradientul de concentrație* ponderat cu coeficientul de difuzie. Acest coeficient este dependent la rândul lui de temperatură și de concentrație (Fig.2.8)

$$\dot{m} = -D(T,C) \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2.45)$$

iar fluxul masic transferat la suprafața unui corp solid este dat de:

$$\dot{m} = -\beta (C_p - C_R) \quad (2.46)$$

unde:

- $\beta$  - coeficientul de transfer termic de suprafață [cm/s];
- $D(T,C)$  - coeficientul de difuzie [cm<sup>2</sup>/s];
- $C_p$  - potențialul de carbon din atmosferă [%C];
- $C_R$  - conținutul de carbon la margine în mediul solid [%C].

Deoarece difuzia unei componente masice se realizează practic pe adâncimi de pătrundere sub 5mm unitatea de măsură al distanței se dă în cm.

Combinând cele două ecuații se deduce că tangenta în punctul ( $x=0$ ) taie curba potențialului de carbon la o distanță

$$S = -D/\beta \quad [cm], \quad (2.47)$$

denumită *distanță de fugă*.

În regim tranzitoriu, ecuația difuziei se exprimă ca

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D(T, C) \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad (2.48)$$

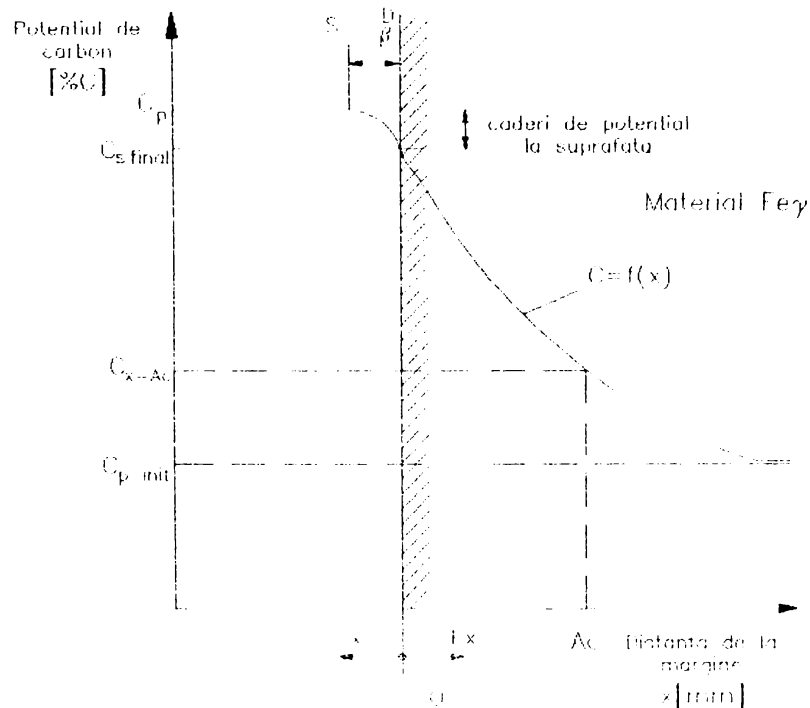


Fig 2.8 Transferul la suprafață și difuzia de masă carbonică în stratul material solid.

#### b) Discretizarea ecuațiilor transferului de masă

Wunning [146] a dezvoltat un set de ecuații, bazate pe metoda diferențelor finite, și prelucrate în concordanță cu rezultatele determinate experimental pentru procese de carburare în mediu gazos, în funcție de mărimea raportului:

$$\frac{C(x,t) - C_k}{C_p - C_k} \in \begin{cases} (0,03 + 0,08) \Rightarrow x + \Delta x + S = \frac{\sqrt{D \Delta t}}{0,37 + \frac{C(x,t) - C_k}{C_p - C_k}} \\ (0,1 + 0,3) \Rightarrow x + \Delta x + S = 2,13 \left( 1 + \frac{C(x,t) - C_k}{C_p - C_k} \right) \sqrt{D \Delta t} \end{cases} \quad (2.49)$$

### II.3 UTILIZAREA METODEI ELEMENTULUI FINIT ȘI A DIFERENȚELOR FINITE ÎN REZOLVAREA PROBLEMELOR DE TRANSFER TERMIC ȘI DE MASĂ

Utilizarea metodei diferențelor finite în rezolvarea problemelor de transfer termic trebuie precedată de discretizarea în elemente finite, respectiv de a crea un model termic [98].

Ecuațiile de transfer termic și de masă sunt aproximare prin ecuații

diferențiale parțiale liniare de tip [19]:

- *parabolic*, prin natura lor dependente de timp, care necesită condiții de singularitate în timp atât spațiale (de frontieră) cât și temporale (care caracterizează regimurile tranzitorii);

- *eliptic*, prin natura lor dependente de condițiile spațiale și care prezintă soluții independente de timp (care caracterizează regimurile staționare).

În acest sens problema creării modelului termic se bazează pe principiul *discretizării* sub două aspecte:

- al *discretizării geometrice spațiale* ( $i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z$ );
- al *discretizării timpului* ( $n\Delta t$ ).

*Nodul termic* se identifică cu centrul de greutate geometric al elementului finit incremental creat. Întreaga masă materială se consideră *concentrată* în nodul termic.

### II.3.1 Model de discretizare spațială

Funcție de particularitățile specifice fiecărei aplicații, modul de discretizare a unui corp solid, indiferent de forma sa geometrică poate fi realizat în variante. Cele mai semnificative întâlnite în lucrare țin cont de următoarele criterii de bază:

- fiecărui *volum de control, suprafață de control sau punct de control "i"* se asociază un *nod termic*;

- în fiecare nod termic *energia termică trebuie să fie conservată*;

În lucrare, ținând cont că cuptoarele electrice industriale sunt de mari dimensiuni iar șarjele reale sunt în general de volume mari, modul de discretizare în elemente finite cel mai adecvat este, plană la schimbul termic prin radiație și punctiformă la transferul termic prin conducție.

#### a) Discretizarea de tip triunghiular (segment) [106]

**Pentru noduri interioare:**

Nodul termic este creat în centrul de greutate al triunghiului (intersecția mediatoarelor). Gradientul de temperatură este astfel perpendicular pe frontiera de separație a doi incrementi spațiali sub temperaturi diferite. Acest tip de model asigură determinarea cu ușurință a conductanțelor termice între noduri și în plus creează mai multe grade de libertate fluxului termic. Bilanțul termic aferent fiecărui nod corespunde pe ansamblu elementului termic respectiv (metoda respectă principiul conservării energiei) [Fig 2.9].

**Pentru noduri cu condiții de frontieră (convecție și/sau radiație):**

Acest tip de model ia în considerare condițiile de singularitate spațială (de frontieră). În aceste condiții la frontiera de schimb cu mediul înconjurător, ecuația de bilanț termic va fi:

$$\Phi_{i \text{ conducție}} = \Phi_{\text{convecție}} + \Phi_{\text{radiație}} \quad (2.50)$$

#### b) Discretizări unidirecționale de tip liniar

În acest caz se adoptă o discretizare punctiformă cu un singur grad de libertate. Acest mod de discretizare este utilizat în mod frecvent în cazul analizei conducției termice prin pereții izolatori ai cuptoarelor industriale, a căror formă

și dimensiuni pot conduce la aproximarea conducerii termice printr-o placă plană.

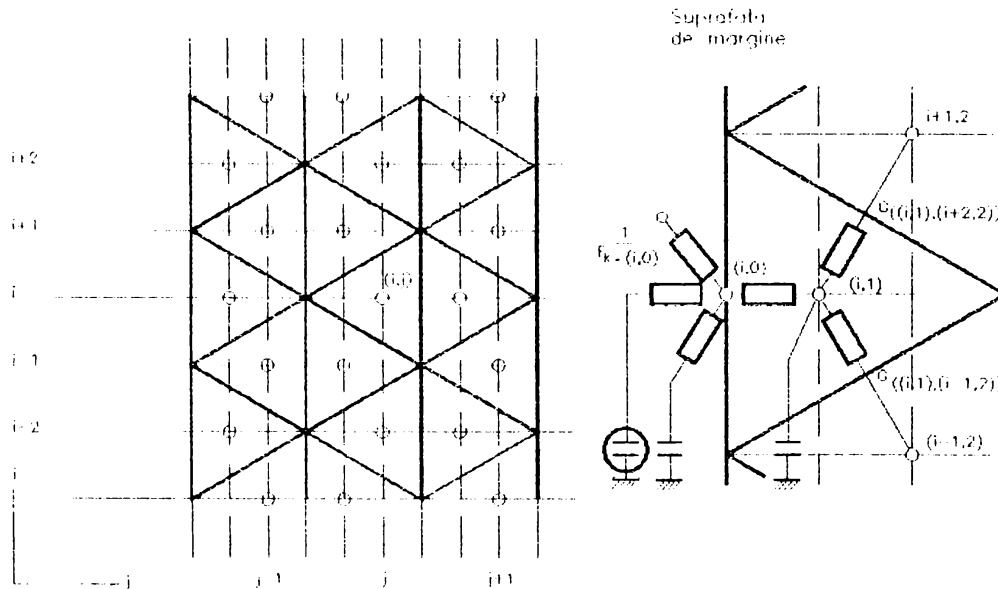


Fig. 2.9 Discretizare spațială cu elemente triunghiulare

### II.3.2 Discretizarea după axa timpului [19]

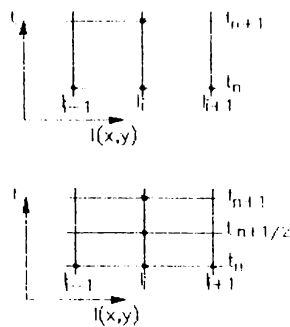


Fig. 2.11 Discretizare timp

În funcție de metodologia de calcul aleasă, se disting pe *criteriul convergenței* următoarele forme de discretizare temporală:

a) În cazul determinării valorii parametrului necunoscut în *formă pur explicită*:

$$\theta_i(t_{n+1}) = f[\theta_i(t_n)] \quad (2.51)$$

adică calculul direct al temperaturii aferent unui nod termic spațial la un anumit nivel de timp ( $t_{n+1}$ ) presupunând cunoscute valorile temperaturii la un nivel de timp anterior ( $t_n$ ). În acest caz condiția minimă de stabilitate este ca:

$$\frac{\Delta t}{\Delta l^2} \leq \frac{1}{2} \quad (2.52)$$

pentru cazul rezolvării cu diferențe finite).

b) În cazul determinării valorii parametrului necunoscut în *formă explicită* cu creșterea rapidității convergenței (*metoda Crank - Nicholson*).

Această metodă reduce dependența în raport cu incrementul de timp  $\Delta t$  și este independentă de valoarea raportului  $\frac{\Delta t}{(\Delta l)^2}$ .

În lucrare s-a utilizat exprimarea sub formă explicită a ecuațiilor diferențiale ceea ce a impus controlul condiției de stabilitate a soluțiilor la fiecare pas de timp și eventuala corectare a incrementului de timp pentru pasul de timp următor.

## II.4 REGLAREA ADAPTIVĂ A PARAMETRILOR TEHNOLOGICI IMPLICAȚII ÎN PROCESE TERMICE

### II.4.1 Principiul reglării cuptoarelor electrice cu încălzire indirectă

#### a) Reglarea adaptiv optimală a temperaturii

Metodele clasice ale sistemelor de reglare automată sunt complet structurate și pot face față numai situațiilor previzibile și admisibile, urmând ca operatorul să realizeze acordarea adecvată anumitor perturbații. Într-un sistem fizic real, care se execută în *circuit închis*, ajustarea răspunsului indicial, bazată pe concepția *circuitului deschis* nu garantează un răspuns bun pentru mărimile de intrare (Fig.2.11) [40].

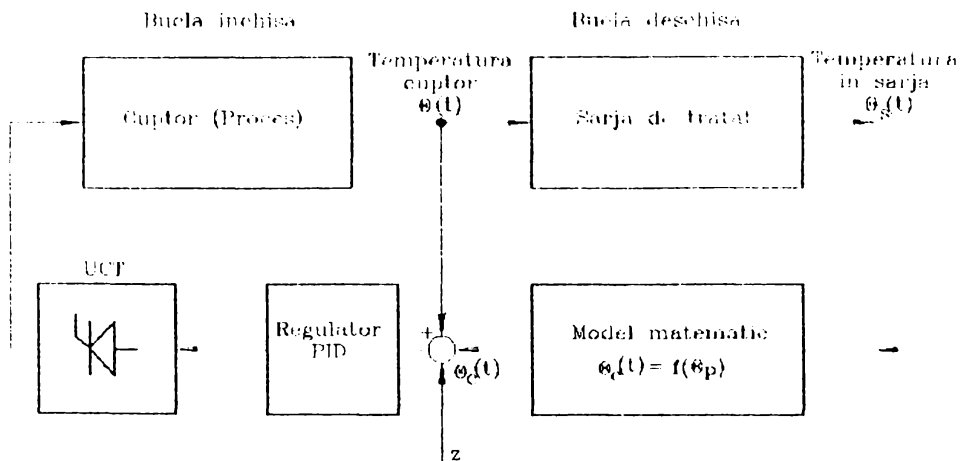


Fig.2.11 Schema de reglare a unui cuptor cu încălzire prin rezistori

În sistemele neliniare, ajustarea unei mărimi a sistemului trebuie să permită compensarea variației parametrilor sistemului ca răspuns la schimbarea condițiilor de funcționare.

În mod riguros, reglarea optimală este o reglare suprapusă unui sistem în circuit deschis în scopul optimizării performanțelor lui, în timp ce reglarea adaptivă este rezervată unui sistem inițial în circuit închis în mod continuu sau discret.

Principiul adaptiv constă în esență din:

- definirea unui sistem optim de funcționare sau a unui indicator de performanță (optimizarea consumului);



- compararea performanței reale cu cea prescrisă;
- ajustarea parametrilor sistemului la funcționarea în circuit închis pentru a forța performanța reală spre cea prescrisă, ceea ce impune o identificare continuă a procesului.

Identificarea sistemului constituie o etapă obligatorie pentru realizarea unei performanțe deosebite, atât de natură tehnologică, cât și energetică.

Prin tehnicile actuale este posibilă realizarea unui model matematic dinamic, care să încorporeze efectul tuturor perturbațiilor de natură internă sau externă procesului.

Acest mod de identificare necesită următoarele etape:

- studiul existenței unui model care să caracterizeze cât mai bine relația dintre mărimea de intrare și mărimea de ieșire, cât și perturbațiile semnificative;
- achiziționarea datelor de intrare-ieșire și alegerea tipului de semnal pentru comandă, respectiv o metodă activă care necesită semnale tipice de intrare produse artificial, utilizând algoritmi "on-line" în buclă închisă (semnalul de intrare ce provine din funcționarea în buclă închisă) nefiind comunicat "off-line";
- determinarea parametrilor optimi ai modelului utilizând, eventual, teoria estimăției prin statistica matematică, bazată pe măsurătorile realizate în timp real și apelând la tehnici de iterație recursivă;
- crearea unui funcții de predicție a mărimii de ieșire pentru a atenua efectul dinamic al timpului mort în timpul procesului.

În Fig.2.12 este reprezentată schema unui estimator de ordinul 2 cu regulator PID și predictor-corector.

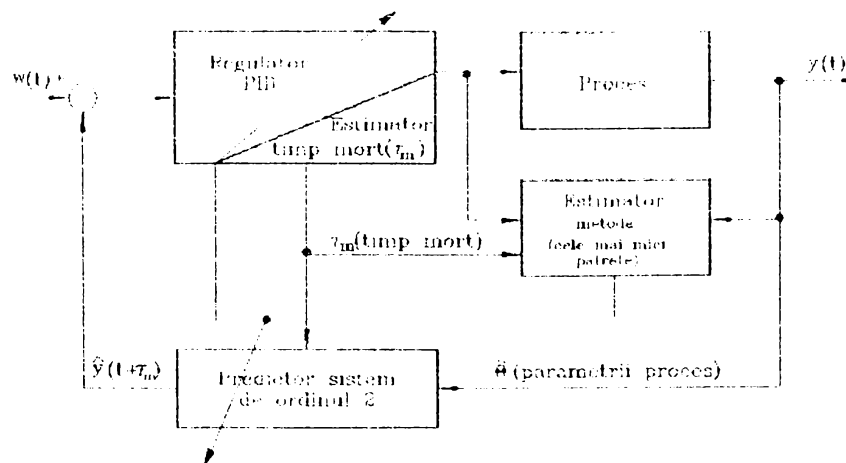


Fig.2.12 Schema bloc a variantei de implementare tratate pentru estimator de proces de ordinul 2

#### b) Caracteristicile cuptoarelor electrice industriale

În Fig.2.13 și Fig.2.14 sunt prezentate modelele matematice acceptate în prezent de cuptoare pentru studiul dinamicii cuptoarelor cu rezistoare [44].

Modelul 2 diferă esențial de modelul 1 prin funcția indicială, respectiv, răspunsul treaptă se realizează în 2 timpi:

- unul inițial, pe durata căruia este decisivă constanta de timp mai mică;
- unul final (faza de saturație a structurilor de izolație termică a cuptorului), în care dominantă este constanta de timp mai lungă.

Procedura de identificare prin metoda treptei, ca și algoritmi utilizați pentru calculul parametrilor, vor fi aceiași pentru ambele modele.

**Modelul 1: Proces de ordinul 2 cu timp mort și inerție termică mare**

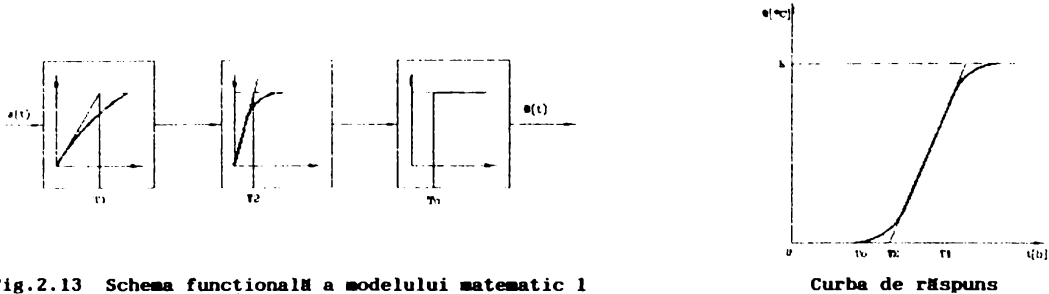


Fig.2.13 Schema funcțională a modelului matematic 1 de cuptor electric

Ecuția de răspuns la un semnal de intrare tip treaptă unitară (putere 100%)

$$\theta(t) = K \left[ 1 - \beta_1 \exp\left(-\frac{t - \tau_m}{T_1}\right) + \beta_2 \exp\left(-\frac{t - \tau_m}{T_2}\right) \right] \quad (2.53)$$

unde:  $T_1 > T_2; \beta_1 + \beta_2 = 1; \beta_1 > 1; \beta_2 < 0;$  (2.54)

$$\beta_1 = T_1 / (T_1 - T_2) \text{ și } \beta_2 = T_2 / (T_2 - T_1) \quad (2.55)$$

**Modelul 2: Proces de ordinul 2 cu timp mort și inerție termică redusă**

În acest caz, funcția de transfer se manifestă în doi timpi:

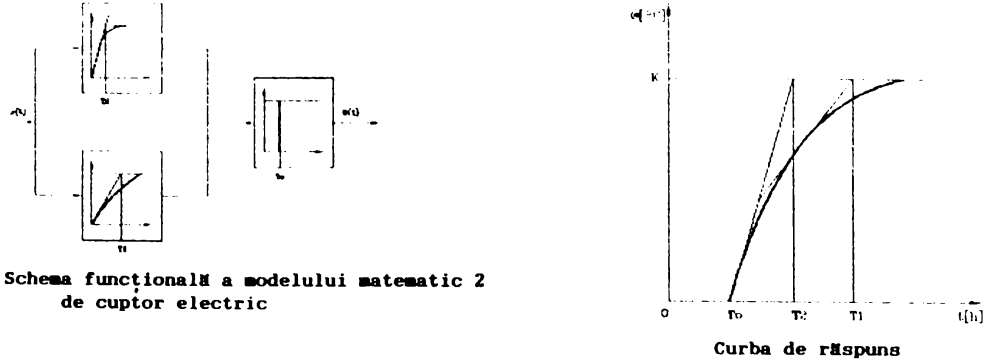


Fig.2.14 Schema funcțională a modelului matematic 2 de cuptor electric

Ecuția de răspuns la un semnal de intrare treaptă unitară (putere 100%)

$$\theta(t) = K \left[ 1 - \beta_1 \exp\left(-\frac{t - \tau_m}{T_1}\right) + \beta_2 \exp\left(-\frac{t - \tau_m}{T_2}\right) \right] \quad (2.56)$$

unde:  $T_1 > T_2, \beta_1 + \beta_2 = 1, \beta_1 > \beta_2, \beta_1 = T_1 / (T_1 - T_2) \text{ și } \beta_2 = T_2 / (T_2 - T_1);$  (2.57)

$$0 < \beta_1 < 1; \text{ și } 0 < \beta_2 < 1; \quad (2.58)$$

Referitor la specificul cuptoarelor cu funcționare discontinuă, care fac obiectul analizei în această lucrare, trebuie făcute următoarele remarci, (Fig. 2.15):

- încălzirea indirectă este dependentă de fluxul termic de radiație al rezistoarelor;
- primul strat de izolație prezintă pe durata regimului tranzitoriu generat de introducerea șarjei reci o acțiune activă prin constanta de timp care suferă variația;
- procesul se derulează pe o șarjă unică și stabilă;
- în cuptor se suprapun fenomene de proces periodice care se vor descompune în componente oscilatorii armonice;
- amplitudinea oscilațiilor temperaturii la ieșire este influențată de mărimea fluxului termic între zonele calde și cele reci ale șarjei;
- capacitățile termice concentrate în zidărie acționează defavorabil, deoarece căldura din ele nu este valorificată ci constituie pierderi, fapt pentru care valoarea lor trebuie redusă cât mai mult posibil.

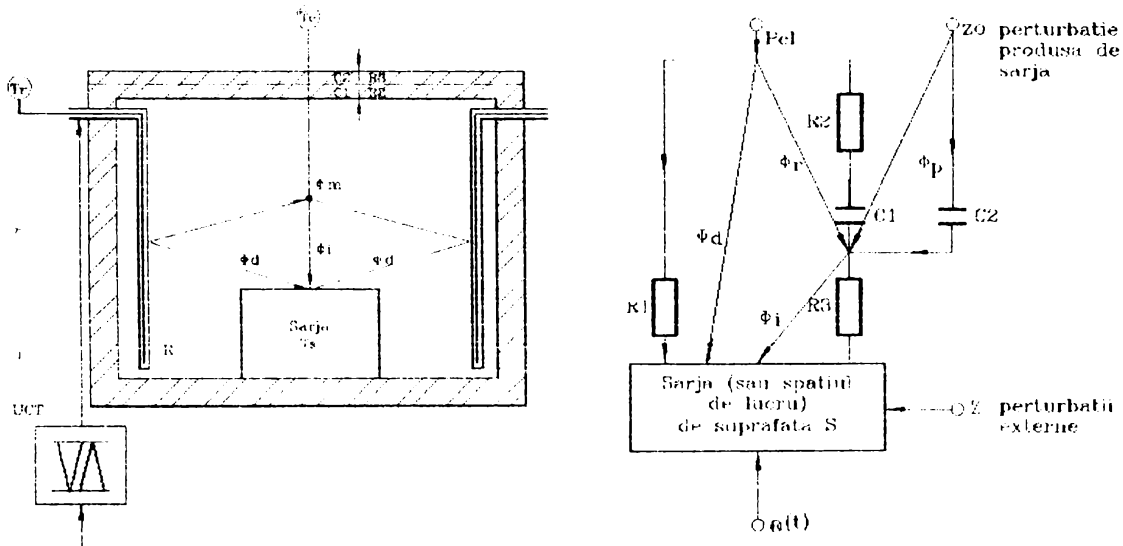


Fig.2.15 Schema bloc a distribuției fluxurilor de căldură în cuptor

#### II.4.2 Identificarea și autoacordarea parametrilor de proces

a) Determinarea constantelor de timp pentru procese de ordinul 2 [39].

- determinarea timpului mort

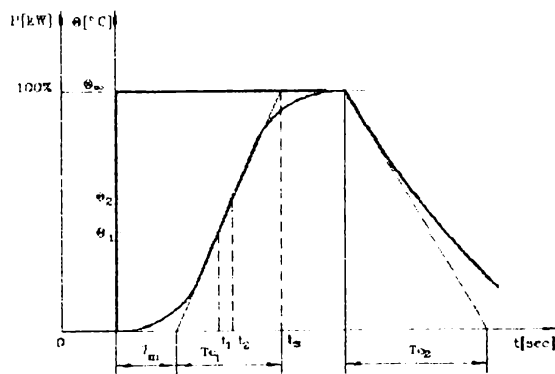


Fig.2.16 Răspuns la semnal treaptă

Timpul mort reprezintă întârzierea în timp a efectului răspunsului la aplicarea unei acțiuni, indiferent de natura acesteia, respectiv un defazaj între unghiul semnalului de intrare și al celui de ieșire.

Pentru determinarea timpului mort se caută intersecția axei timpului cu dreapta care determină punctul de inflexiune.

$$\frac{t - t_1}{t_2 - t_1} = \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \quad (2.59)$$

respectiv, pentru "i" citiri succesive:

$$\tau_i = t_{1i} - \frac{\theta_{1i}(t_{2i} - t_{1i})}{\theta_{2i} - \theta_{1i}} \quad [\text{s}] \quad (2.60)$$

Timpul mort este maximul din șirul mărimilor determinate:

$$\tau_m = \max.(\tau_i) \quad (2.61)$$

- determinarea factorului de amplificare

$$k_f = \frac{\theta_m}{\Delta P_{\max}} \quad [^\circ\text{C/W}] \quad (2.62)$$

unde  $\Delta P_{\max}$  reprezintă amplitudinea treptei aplicate procesului.

- determinarea constantelor de timp

Funcția de transfer pentru sisteme de ordinul 2 este:

$$H(s) = \frac{k_f}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} = \frac{k_f p_1 p_2}{(s_1 + p_1)(s_2 + p_2)} = \frac{k_f \omega_0^2}{s^2 + 2\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (2.63)$$

unde:

- $T_1, T_2$  - constante de timp;
- $p_1, p_2$  - poli;
- $\xi$  - factor de amortizare;
- $\omega_0$  - pulsația naturală;

care se exprimă în modul următor:

$$T_{1,2} = \frac{\xi}{\omega_0} \pm \frac{1}{\omega_0} \sqrt{\xi^2 - 1} \quad \xi = \frac{T_1 + T_2}{2\sqrt{T_1 T_2}} \quad p_1 = \frac{1}{T_1} \quad p_2 = \frac{1}{T_2} \quad (2.64)$$

Utilizând aproximarea unei funcții empirice printr-o combinație liniară exponențială, funcția de răspuns a sistemului de ordinul 2 se scrie ca:

$$\theta(t) = k_f \beta \left[ 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t - \tau_m}{T_1}} + \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t - \tau_m}{T_2}} \right] \quad (2.65)$$

Pentru a determina constantele de timp  $T_1$  și  $T_2$  se utilizează procedura de extrapolare prin metoda celor mai mici pătrate.

- discretizarea funcției de transfer pentru sisteme de ordinul 2

Aplicând transformata Laplace, se obține exprimarea în planul Z a funcției de transfer care, prin discretizare, conduce la următoarele rezultate:

$$a_1 = -e^{-\frac{T}{T_1}} - e^{-\frac{T}{T_2}}$$

$$a_2 = e^{\frac{T}{T_1}} e^{\frac{T}{T_2}}$$

$$b_1 = -A \left( e^{-\frac{T}{T_2}} \right) - B \left( e^{-\frac{T}{T_2}} + 1 \right) - C \left( e^{-\frac{T}{T_1}} + 1 \right)$$

$$b_2 = A e^{\frac{T}{T_1}} e^{\frac{T}{T_2}} + B e^{\frac{T}{T_2}} + C e^{\frac{T}{T_1}}$$

unde:

$$T = t + \tau_m, \quad A = k_f, \quad B = \frac{k_f p_2}{p_1 - p_2}, \quad C = \frac{k p_1}{p_2 - p_1} \quad (2.67)$$

Poziția geometrică a polilor conjugăți ( $p_1$  și  $p_2$ ) și a zeroului  $z_1$  în plan complex determină criteriile de funcționare optimă și stabilă a procesului (suprareglaj și timp de răspuns).

$$H_R(z) = \frac{K_R (1 - f) (R_2(z))}{(z_1 - 1)(z - f)} \quad (2.68)$$

În vederea acordării se consideră funcția de transfer a regulatorului PID cu filtru, unde:

$$R_R(z) = (1 + K_I + K_D)z^2 - (1 + 2K_D)z + K_D \quad (2.69)$$

- funcția de transfer pentru proces:

$$H_P(z) = \frac{b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0} = \frac{B_1(z)}{A_2(z)} \quad (2.70)$$

în care timpul mort se omite considerând utilizarea unui predictor;

- funcția de transfer a buclei deschise:

$$H(z) = H_R(z) H_P(z) = \frac{x m (1 - f) (b_1 z + b_0)}{(z - 1)(z - f)} \quad (2.71)$$

unde:

$$K_I = -\frac{1 + a_0 + a_1}{a_1 + 2a_0}, \quad K_D = -\frac{a_0}{a_0 + 2a_0} \quad (2.72)$$

iar

$$m = 1 + K_I + K_D, \quad x = K_R \quad (2.73)$$

unde:  $K_I, K_D$  - dictate din considerente de compensare prin anulare;

- funcția de transfer a buclei închise:

$$H_0(z) = \frac{H(z)}{1 + H(z)} = \frac{K_0^{\text{II}}(z - z_1)}{z^2 + az + b} \quad (2.74)$$

unde:

$$a = -(p_1 + p_2) \quad (2.75)$$

$$b = p_1 p_2 \quad (2.76)$$

$$K_0^{\text{II}} = (1 + a + b)/(1 - z_1) \text{ (din considerente de abatere staționară nulă)} \quad (2.77)$$

Din egalitatea celor două funcții de transfer:

$$H(z) = H_0(z) \quad (2.78)$$

rezultă:

$$x = K_R = \frac{\frac{f = b + az_1 + z_1}{1 - z_1}}{mb_1(1 - b - 2z_1 - az_1)} \quad (2.79)$$

unde:  $z \in (-1, 0)$

#### II.4.2 Comanda graduală a puterii electrice de încălzire

##### a) Puterea electrică în cuptoare

În cazul utilizării echipamentelor electronice de putere pentru comanda încălzirii atunci, în cadrul analizei conducției electrice și al determinării puterii transformate în căldură, se impun elemente particulare care țin cont de specificul echipamentului [Tab.2.1] [12].

Tabel 2.1

Mărimi electrice	Tiristori comandați în unghi de fază	Tiristori comandați în tren de unde

<p>Parametri caracteristici</p>	<p><math>\psi</math>-unghi de amorsare tiristor</p> $0 \leq \psi \leq \pi$ <p><math>\omega</math>-pulsatia</p> $\omega = 100 \pi \quad (2.80)$ <p>T-perioada,</p> $T = 2 \pi \quad (2.81)$ <p>u-tensiunea instantanee</p> $u = Ri$	<p><math>t_c</math>-timp de conducție, un număr întreg de</p> <p>perioada <math>K_1 \cdot \frac{2 \pi}{\omega}</math></p> $(2.90)$ <p><math>t_d</math>-timp de neconducție</p> <p><math>t_{ciclu}</math>-timp total de ciclu un număr întreg de perioada</p> $K_2 \cdot \frac{2 \pi}{\omega}$ $(2.91)$ $t_{ciclu} = t_c + t_d (2.92)$
<p>Valoarea instantanee a curentului (i)</p>	$i = I_m \cdot \sin \omega t \quad (2.82)$ <p>pentru</p> $\frac{\psi}{\omega} < t < \frac{\pi}{\omega} \quad \& i$ $\frac{\psi}{\omega} + \frac{\psi}{\omega} < t < \frac{2 \pi}{\omega}$ <p><math>i = 0</math> (celelalte valori ale lui t)</p>	<p><math>i = 0</math>, când</p> $t_c < t < t_c + t_d$ $i = I_m \cdot \sin \omega t, \quad (2.93)$ <p>când</p> $t_d < t < t_c$
<p>Valoarea eficace a curentului (<math>I_{ef}</math>)</p>	$I_{of} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_0^T i^2 dt} =$ $= \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin 2 \psi}{2 \pi}} =$ $= \frac{U}{R} \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin 2 \psi}{2 \pi}}$	$I_{of} = \frac{1}{t_{ciclu}} \sqrt{\int_0^{t_{ciclu}} i^2 dt} =$ $= \frac{i_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{t_c}{t_c + t_d}} = \frac{U}{R} \sqrt{\frac{t_c}{t_c + t_d}}$ $(2.83)$
<p>Puterea activa P</p>	$P = RI^2 = \frac{U^2}{R} \left( 1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin 2 \psi}{2 \pi} \right) \quad (2.94)$	$P = RI^2 = \frac{U^2}{R} \left( \frac{t_c}{t_c + t_d} \right) \quad (2.84)$

Tensiunea eficace ( $U_{ef}$ )	$U_{of} = U \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin 2\psi}{2\pi}}$ (2.95)	$U_{ef} = U \sqrt{\frac{t_c}{t_c + t_d}}$ (2.86)
Puterea aparentă	$S = UI = \frac{U^2}{R} \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{\sin 2\psi}{2\pi}}$ (2.96)	$S = UI = \frac{U^2}{R} \frac{t_c}{t_c + t_d}$ (2.87)
Factorul de putere		
Putere reactivă	$Q = \frac{U^2}{R} \frac{1 - \cos 2\psi}{2\pi}$ (2.97)	$Q = 0$ (2.98)
Putere deformantă	$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2$ (2.88)	$D^2 = S^2 - P^2$ (2.89)
Paraziți	-paraziți cu frecvențe radioelectronice, propagați prin curenții de conducție în conductori și prin radiație electromagnetică; -generează curenți armonici care se propagă în rețeaua de alimentare	-pot genera efectul Flicker

b) Discretizarea funcției de reglare a puterii

Funcționarea unui regulator cu comportare PID este aproximată matematic prin relația:

$$U(t) = \left[ K_p \sum (t) + K_i \int_0^t \sum (t) dt + K_d \frac{d\sum (t)}{dt} \right] \quad (2.100)$$

unde:  $U(t)$  - mărime de comandă;  
 $\Sigma(t) = e_{con} - e(t)$  - diferența dintre mărimea de consemn și mărimea de ieșire prelevată la un moment de timp  $t$ ;



- $K_p$  - constanta de proporționalitate;  
 $K_I$  - constanta de integrare ( $K_I = 1/T_I$ );  
 $K_D$  - constanta de derivare ( $K_D = 1/T_D$ ).

Referitor la cuptoare electrice această relație poate fi transcrisă ca:

$$P_d(t) = K_p \Delta \theta(t) + K_I \int_0^t \Delta \theta(t) dt + K_D \frac{d[\Delta \theta(t)]}{dt} \quad (2.101)$$

unde 
$$\Delta \theta = \theta_{\text{cons}} - \theta_1(t) \quad (2.102)$$

care sub formă discretizată se exprimă ca:

$$\Delta P(t)^{t+1} = K_p \Delta (\theta_{\text{cons}} - \theta_m^t) + K_I \sum_i (\theta_{\text{cons}} - \theta_{m_i}^t) + K_D [(\theta_{\text{cons}} - \theta_m^t) - (\theta_{\text{cons}} - \theta_m^{t-1})] [\%] \quad (2.103)$$

sau, pentru o comandă bipozițională:

$$\Delta P(t)^{t+1} = \frac{t_{\text{conducție}}}{t_{\text{ciclu}}} = \frac{t_{\text{conducție}}}{t_{\text{conducție}} + t_{\text{neconducție}}} \quad (2.104)$$

Comanda de dozare a puterii se realizează prin controlul duratei de conducție (în cazul contactorilor statici), sau a unghiului de aprindere (în cazul variatoarelor de tensiune cu tren de undă) [113].

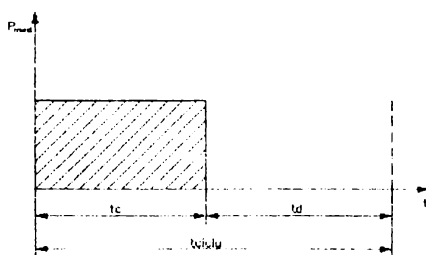


Fig. 2.18 Comandă în putere medie a regulatorului

În cazul comenzii puterii prin tren de undă variabil (Fig. 2.18), puterea electrică medie pe sarcină este dată de relația

$$P = \frac{U_2^2}{R} \frac{t_{cd}}{t_{cm}} \quad (2.105)$$

care este o funcție discontinuă deoarece se referă numai la pași discreți definiți prin  $t_c$  și  $t_{cl}$ , în care:

- $t_c$  - perioade de conducție variabilă [s]  
 $t_c = n_1 \cdot 0,02$  ( $n \in N$ );  
 $t_d$  - perioade de neconducție variabilă [s]  
 $t_d = t_{cl} - t_c$ ;  
 $t_{cl}$  - perioada fixă a ciclului de comandă [s]  
 $t_{cl} \approx 100$   
 $U_2$  - tensiunea eficientă de alimentare pe sarcină care poate varia din cauze externe, [V],  $U_2 = f(t)$  ;  
 $R$  - rezistența electrică a rezistorului care poate fi considerată constantă în jurul valorii temperaturii de funcționare în cuptor ( $R \approx \text{constant}$ ), [Ω].

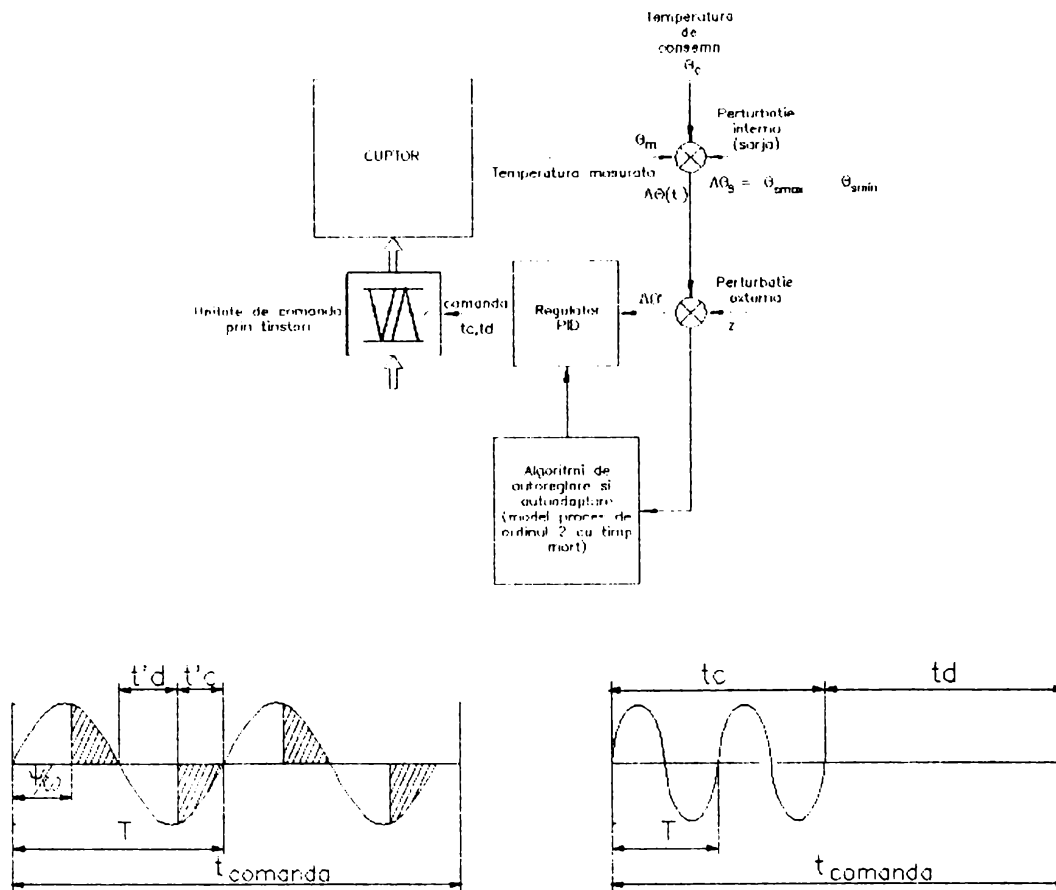


Fig.2.19 Comanda adaptivă pentru dozarea graduală a puterii

## II.5 ÎNCĂLZIREA CORPURILOR TERMIC SUBȚIRI.

Pătrunderea fluxului termic prin secțiunea unui corp depinde de rezistența termică a corpului la conducție:

$$R_{th} = \frac{L}{\lambda S} \quad (2.106)$$

Dimensiunea caracteristică a pieselor,  $L$ , e grosimea de material ce trebuie traversată de fluxul termic pentru a încălzi în adâncime. La un anumit tip de piesă dat, această dimensiune caracteristică depinde de dispunerea sa în cuptor.

Variația de temperatură și fluxul termic pot fi exprimate funcție de parametrii criteriali, în cazul corpurilor plane încălzite pe o față, respectiv

$$Bi = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad - \text{criteriul Biot} \quad (2.107)$$

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} = \frac{\lambda t}{\rho c L^2} \quad - \text{criteriul Fourier} \quad (2.108)$$

unde  $L$  reprezintă dimensiunea caracteristică .

Când valoarea lui  $Bi$  este foarte mică rezistența la conducția internă este neglijabilă în raport cu rezistența la convecție. Acest lucru implică considerarea unei distribuții uniforme a temperaturii în întreg corpul piesei, caz în care analiza comportării termice poate fi aproximată prin analiza *capacităților termice concentrate* [149].

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{R_{th} C_m} = \frac{\alpha S}{\gamma c V} t = Bi Fo \quad (2.109)$$

Analiza capacităților termice concentrate este cea care presupune că rezistența internă a corpului este neglijabilă în comparație cu rezistența la schimb convectiv cu exteriorul. În acest caz pierderile termice la suprafață (convective sau radiante) se evidențiază printr-o scădere a energiei interne a corpului.

Aplicabilitatea analizei transferului termic prin capacități concentrate este condiționată de îndeplinirea următoarei relații [75]

$$Bi = \frac{\alpha(V/S)}{\lambda} \leq 0,2 \quad (2.110)$$

unde  $\alpha$  - coeficient de schimb termic la suprafață (prin convecție sau radiație);  
 $V$  - volumul corpului [ $m^3$ ];  
 $S$  - suprafața corpului [ $m^2$ ];

Piese termic subțiri sunt cele mai frecvente tipuri de piese tratate în cuptoarele industriale.

O piesă este definită *termic subțire* dacă pe durata întregii perioade de încălzire diferența între temperatura de la suprafață și cea din centrul piesei rămâne scăzută (fără importanță practică pentru procesul considerat). Cu aceste date se poate considera că temperatura unui corp solid expus brusc unui mediu înconjurător cu care schimbă energie convectivă sau radiantă, variază temporal dar nu și spațial, respectiv conductivitatea termică a corpului este presupusă ca fiind infinită [80].

Caracterul termic subțire al pieselor din care este constituită șarja de tratat este dat de criteriul Biot ca parametru de control [149]:

$$Bi = \frac{\alpha_r \left( \frac{\theta_c + 273}{100} \right)^3 (V/S)}{\lambda} \leq 0,2 \quad (2.111)$$

unde  $\alpha_r$  - coeficientul de transfer termic prin radiație [ $W/m^2 K^3$ ];  
 $\theta_c$  - temperatura din cuptor [ $^{\circ}C$ ];  
 $V$  - volumul piesei [ $m^3$ ];  
 $S$  - suprafața piesei [ $m^2$ ];  
 $\lambda$  - conductivitatea termică a materialului [ $W/m^{\circ}C$ ];

$$\alpha_r = \frac{\sigma(T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{e_1} + \frac{S_1}{S_2} \left( \frac{1}{e_2} - 1 \right)} \quad (2.112)$$

unde  $T_1, T_2$  - sunt temperaturile suprafețelor care schimbă energie termică

	prin radiație [K];
$\epsilon_1, \epsilon_2$	- coeficienții de emisivitate ai suprafețelor de schimb termic prin radiație;
$S_1$	- suprafața șarjei [ $m^2$ ];
$S_2$	- suprafața pereților radianți [ $m^2$ ].

## II.6 Considerații privind variabilitatea unor mărimi de material

Unele mărimi de material sunt influențate, într-o oarecare măsură, de variația în timp a temperaturii materialului și de modificarea compoziției chimice pe durata ciclului de tratament.

Aceste variații ale mărimilor pot fi în unele cazuri extrem de importante, fapt pentru care trebuie corectate în timp funcțiile de noile valori ale temperaturii sau concentrației la momentul de timp respectiv. Într-un calcul de simulare pas cu pas acest lucru este nu numai posibil dar și necesar. În ceea ce urmează vom face câteva considerații privind modul cum a fost tratată această problemă în lucrare atât privind analiza transferului termic cât și analiza transferului de masă.

### II.6.1 Variația conductivității termice cu temperatura ( $\lambda=f(\theta)$ )

#### a) Pentru materiale ceramice refractare [56,64]

Materialele ceramice izolante prezintă o conductivitate care variază foarte puternic cu temperatura. În general aceste conductivități sunt date de fabricanții de materiale izolante pentru valori treaptă de temperatură (per/100°C), dar trebuie menționat faptul că aceste valori nu mai sunt strict corecte după un anumit număr de ore de funcționare, precum și în condițiile în care mediul din incinta cuptorului este bogat în hidrogen.

Pentru majoritatea materialelor, în domeniul normal de utilizare, conductivitatea termică urmează legea [12]:

$$\lambda = \lambda_0 \exp(k\theta) \quad (2.113)$$

unde  $\lambda_0$  și  $k$  - sunt caracteristici specifice tipului de material;  
 $\theta$  - temperatura [°C].

Constata,  $k$  variază mult de la un material la altul, ea este mai mare cu cât variațiile lui  $\lambda$  sunt mai mari cu temperatura. Deasemeni, conductivitatea materialului crește cu temperatura cu atât mai mult pentru același material, cu cât masa volumică este mai mică.

În calculele efectuate pentru determinarea fluxului termic prin pereți s-au considerat valori medii ale conductivității materialului, pe grosimea unui increment spațial de ordinul "i" [12]:

$$\lambda_i(\theta) = \lambda_0 \frac{\exp(k_1 \theta_i) - \exp(k_1 \theta_{i-1})}{k_1 (\theta_i - \theta_{i-1})} \quad [W/m \cdot C] \quad (2.114)$$

unde  $\theta_i$  - temperatura pe fața mai caldă a elementului incremental "i";  
 $\theta_{i-1}$  - temperatura pe fața mai rece a elementului incremental "i".

Pentru condițiile în care incinta cuptorului umplută cu atmosferă cu conținut ridicat de hidrogen, atmosfera care vine în contact direct cu materialul

izolant, conductivitatea termică a pereților izolatori este puternic influențată de procentul de  $H_2$  așa încât [46]:

$$9\lambda(\theta, \%N_2) = \lambda_{\text{mod}}(\theta) + p_{H_2} 10^{-3}(1 + 2,5 \cdot 10^{-3}\theta) \quad (2.115)$$

unde  $\lambda_1(\theta)$  - conductivitatea termică medie a materialului izolator pentru condiții de funcționare în aer [W/m°C];

$p_{H_2}$  - conținutul de  $H_2$  din atmosferă [%];

$\theta$  - temperatura medie a stratului izolator [°C].

$$\theta = \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2} \quad [^\circ\text{C}] \quad (2.116)$$

#### b) Pentru materiale metalice

R.E. Krezhizhanovsky [80] a sugerat o metodă pentru calculul conductivității oțelurilor presupunând că pentru un tratament termic dat conductivitatea termică este o funcție de conținutul volumic în oțel, celelalte elemente (cu excepția fierului) și de temperatură. Conținutul volumic în gradul de aliere este calculat cu formula:

$$V = \sum g_i \frac{M_{Fe}}{M_i} \quad [\%] \quad (2.117)$$

unde  $V$  - conținutul volumic al componentelor de aliere;

$g_i$  - conținutul masic al elementului în oțel;

$M$  - masa atomică;

Ținând cont de această relație au fost stabilite următoarele formule de calcul a conductivității termice pentru diferite tipuri de materiale:

#### b.1) Oțeluri carbon

$$\lambda = 33,5 + k(635 - \theta)10^{-2} \quad [\text{W/m}^\circ\text{C}] \quad (2.118)$$

unde factorul  $k$  depinde de gradul de aliere al oțelului și poate fi calculat făcând apel la tabelele lucrării [12] din bibliografie [80].

Formula este aplicabilă în domeniul 0,2 la 7% pentru  $\theta$  de la 50 la 500°C. Precizia formulei este de aproximativ 10 la 12 %.

Pentru același tip de materiale B.E. Neimark oferă o altă formulă de determinare a conductibilității:

$$\lambda = a - b \sum + c \sum^2 \quad (2.119)$$

$$a = 76,8 - 6,68 \cdot 10^{-2} \theta$$

$$b = 34,2 - 9,9 \cdot 10^{-2} \theta + 0,815 \cdot 10^{-4} \theta^2 \quad (2.120)$$

$$c = 9,31 - 3,96 \cdot 10^{-2} \theta + 0,418 \cdot 10^{-4} \theta^2$$

$\sum$  - suma celorlalte elemente (C, Si, Mn etc.) raportate la masă;

Formula e aplicabilă pentru valori ale lui  $\sum$  de la 0,1 la 0,2 și temperaturi sub 500°C, prezentând o precizie de  $\pm 4\%$  [80]. Se utilizează în lucrare la determinarea coeficientului de transfer termic conductiv prin traversări ale pereților cuptorului de către axe metalice (borne, temocuple, ax agitator, conducte)

**b.2) Oțeluri austenitice**

Formula de calcul este:

$$\lambda = 13,85 + 15,49 \cdot 10^{-3} \theta \quad (2.121)$$

aplicabilă în domeniul 50 la 900°C și asigură o precizie de 10 la 15% [80].

**b.3) Oțeluri austenitice Cr-Ni:**

Formula de calcul este:

$$\lambda = 15,5 - a + (1,28 + b) 10^{-2} \theta \quad (2.122)$$

unde:

$$a = 11,6(\sigma - 0,5) \quad , \quad b = 1,34(\sigma - 0,5) \quad (2.123)$$

iar

$$\sigma = \frac{C}{12} + \frac{Si}{28} + \frac{Mn}{55} + \frac{Cr}{52} + \frac{Ni}{59} + \frac{W}{184} + \frac{Nb}{93} + \frac{Mo}{96} + \dots \quad (2.124)$$

formula care este aplicabilă în domeniul până la 900°C,  $\sigma$  între 0,5 și 0,8 și asigură o precizie de  $\pm 4\%$  [80].

**II.6.2 Variația căldurii masice cu temperatura,  $c(\theta)$**

Evaluarea capacității termice masice nu pune probleme în următoarele condiții [12]:

- utilizarea unei unități de măsură adecvată:

$$\frac{Wh}{kg^{\circ}C} = \frac{1}{3,6} \frac{kJ}{kg^{\circ}C} = 1,16 \frac{kcal}{kg^{\circ}C} \quad (2.125)$$

- în calculele pas cu pas trebuie utilizate capacitățile termice instantanee la temperatura  $\theta^{\circ}C$  și nu capacitatea termică necesară creșterii temperaturii de la 0 (sau 20°C) la  $\theta^{\circ}C$ .

**a) Pentru materiale ceramice refractare**

În cazul materialelor ceramice refractare, valorile căldurii specifice, utilizate în calculul capacității termice și a energiei acumulate, pot fi luate ca valori constante, după cum urmează [12]:

- pentru materiale silico-aluminoase (cărămizi grele și ușoare, fibre ceramice și vată minerală), valoarea curentă este:

$$c = 0,28 \text{ Wh/kg}^{\circ}C$$

cu valori extreme de 0,26 la 0,31 Wh/kg °C.

- pentru panouri din silicat de calciu valoarea curentă este:

$$c = 0,21 \text{ Wh/kg}^{\circ}C$$

cu valori extreme de la 0,20 la 0,23 Wh/kg °C.

**b) Pentru materiale metalice**

În calculele pas cu pas trebuie introdusă capacitatea termică masică cu

legea ei de variație liniară în funcție de temperatura materialului [12],

$$99c = c_0(1 + dx\theta) \quad [\text{Wh/kg}^\circ\text{C}] \quad (2.126)$$

Utilizarea unei valori medii nu este recomandabilă deoarece variația lui  $c$  în cursul unui ciclu de încălzire nu este de neglijat. În caz contrar eroarea de determinare a timpului de încălzire a șarjei poate deveni apreciabilă.

### II.6.3 Variația masei volumice $\gamma$

Masa volumică a materialelor metalice,  $\gamma$  [ $\text{kg/m}^3$ ], se poate considera practic constantă la variațiile de temperatură [56].

Pentru materialele ceramice de înzidire masa volumică a materialului trebuie majorată cu 8-10% față de valorile date în catalog pentru a lua în considerare materialele de adaus (mortar sau cleiuri) utilizate la înzidire [56].

### II.6.4 Valorile factorului de emisivitate ( $\epsilon$ )

Valorile factorului de emisivitate diferă de la material la material și funcție de starea de prelucrare și curățire a suprafeței materialului. Valorile factorului de emisivitate se consideră invariabil cu temperatura și este dat de fabricant, în cazul materialelor de confecționare rezistori sau materiale de înzidire. Mult mai dificil este de a estima valorile factorului de emisivitate pentru materialele din bare este constituită șarja. În cadrul lucrării s-a considerat un factor mai scăzut ( $\epsilon = 0,6$ ) pentru șarjă dat fiind posibilitatea ca piesele să nu fie complet curățate de urme ale agenților chimici care intervin în operațiile anterioare procesului de încălzire.

### II.6.5 Variația coeficientului de schimb termic convectiv la suprafață, $\alpha$

Cuantificarea coeficientului de transfer termic prin convecție la suprafață este deosebit de greoaie din punct de vedere analitic cu atât mai mult cu cât acest coeficient ține cont de o multitudine de factori [12]:

- forma suprafeței și starea de prelucrare a acestei suprafețe;
- orientarea acestei suprafețe în raport cu curentul agentului care spală această suprafață;
- viteza fluidului.

Determinarea coeficientului de schimb prin convecție este mai important în calculul temperaturii la suprafața cuptorului acolo unde temperatura mediului ambiant poate suferi variații considerabile pe durata unui ciclu și care în mod obișnuit nu sunt controlate.

Este posibil de a determina acest coeficient cu formula [12]:

$$\alpha_c = 7 + 0,075(\theta_p - \theta_a) \quad (2.127)$$

Pentru cazul schimburilor termice prin convecție în interiorul cuptorului se poate utiliza cu o bună aproximație următoarea formulă, pentru variația temperaturii cuptorului între 200 și 700°C [12]:

unde  $v$  - viteza de convecție a fluidului peste suprafața de schimb termic [ $\text{m/s}$ ];

$$\alpha_c = 2,3 + 195 \sqrt{\frac{\nu}{\theta + 283}} \quad (2.128)$$

### II.6.6 Variația cu temperatura a rezistenței conductorilor de încălzire

Pentru calculul variației rezistenței electrice a elementelor încălzitoare metalice de tip rezistiv, în lucrare s-a utilizat formula de variație

$$R_t = R_{20} (1 + \alpha \Delta \theta) \quad [\Omega] \quad (2.129)$$

unde:  $\Delta \theta = \theta_r - \theta_a$  [°C]

$\theta_r$  - temperatura elementului încălzitor la temperatura ambiantă [°C];

$\theta_a$  - temperatura mediului ambiant [°C];

$\alpha$  - coeficient de variație a rezistivității electrice cu temperatura [1/°C];

$R_{20} = \rho_{20} \frac{l}{S}$  - rezistența electrică a elementului încălzitor la 20°C [Ω];

### II.6.7 Variația cu temperatura și concentrația a coeficientului de difuzie masică

Coeficientul de difuzie masică se calculează cu formula [145]:

$$D = 0,47 \exp \left[ -1,6 C - \frac{(37000 - 6600 C)}{RT} \right] \quad [\text{cm}^2/\text{s}] \quad (2.130)$$

unde C - conținutul de carbon [%];

R - constanta universală a gazelor;

T - temperatura [k].

### II.6.8 Variația cu concentrația a coeficientului de schimb de masă la suprafață

Conform recomandărilor din literatură [145], valorile lui  $\beta$  pot fi considerate constante în anumite condiții:

- pentru gaz endotermic preparat din gaz metan sau propan

$$\beta = 1,25 \cdot 10^{-5} \quad [\text{cm/s}];$$

- pentru gaz endotermic preparat din alcool disociat, fără azot

$$\beta = 2,5 \cdot 10^{-5} \quad [\text{cm/s}].$$



## **CAP. III MODEL MATEMATIC PENTRU OPTIMIZAREA PRIN SIMULARE A UNUI PROCES TEHNOLOGIC COMPLEX REALIZAT IN CUPTOARE ELECTRICE CU INCALZIRE INDIRECTA PRIN REZISTOARE**

### **III.1 CONSIDERAȚII GENERALE**

Scopul principal lucrării este obținerea *prin simulare* a unei rețete optime sub aspect energetic a regimului de funcționare al cuptoarelor industriale cu încălzire indirectă prin rezistoare. Pentru atingerea acestui scop analiza trebuie construită pe performanțele termice reale ale cuptorului și în conformitate cu regimul tehnologic de exploatare, raportat la o sarcină de producție dată. Pentru aceasta este necesară realizarea unui *model matematic, cu o structură completă*, care să analizeze și să integreze în procesul de simulare întregul *ansamblu constructiv și fenomenologic implicat în procesul tehnologic* de tratament termic ce urmează a fi realizat în condițiile reale, date sau impuse prin unele restricții de ordin tehnologic.

Acest optim energetic se poate obține în exploatare prin determinarea cu o aproximare corespunzătoare a *productivității maxim posibilă*, respectiv pentru o sarcină nominală, condiție pentru care sunt garantate *consumuri specifice* minime, controlabile și reproductibile în timp, atât pentru energia electrică, cât și pentru fluidele tehnologice.

Cuptoarele electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare sunt *cele mai utilizate echipamente electrotermice cu destinații tehnologice*, în cele mai diverse variante constructive și cu caracteristici particulare, în raport cu destinația tehnologică. Cuptoare de același tip sunt supuse în exploatare unor regimuri diferite în funcție de specificul producției, a caracteristicilor geometrice și de material pentru reperul tehnologic din care se constituie șarja de tratat, de modul de distribuție și configurare a șarjei în incinta cuptorului, precum și de tipul de tratament termic.

Tratamentele termice realizate în cuptoarele electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare și care prezintă un grad ridicat de complexitate sunt tratamentele termochimice în care sunt implicați *doi parametri de proces*, interdependenți în proces, ce trebuiesc controlați și reglați (temperatura și potențialul de carbon).

Luând în considerare numai aceste elemente ce constituie părți ale unui ansamblu integrat, care participă în mod intercondiționat și variabil pe durata desfășurării unui proces real, s-a stabilit ca modelul matematic de proces să prezinte următoarea structură de bază:

1\*) un *model matematic destinat cuptorului* în scopul identificării performanțelor lui termice, statice și dinamice, pe baza unei structuri de bilanț termic global, utilizând ca date de modelare elementele constructive ale unui cuptor real;

2\*) un *model matematic destinat instalației de încălzire* prin rezistoare în scopul identificării caracteristicilor nominale și disponibile de transfer al căldurii, utilizând ca date de modelare elementele constructive ale unei instalații reale;

3\*) un *model matematic destinat modelării geometrice și termice* a șarjei supusă tratamentului termic în scopul determinării prin simulare a parametrilor

de procesare tehnologică pe baza unor criterii de similitudine cu șarja brută reală;

4°) un *model matematic destinat simulării procesului de tratament termic* în diferite variante opționale de reglare a temperaturii și de dozare a puterii electrice de încălzire, cu sau fără restricții impuse de ordin tehnologic. Cu acest model se obțin anticipat informații privind evoluția în timp a temperaturii în diferite puncte de control din cuptor și din șarjă, a puterii electrice absorbite, a consumului total de energie electrică pe durata de timp necesară realizării încălzirii complete și uniforme a șarjei în condițiile finale de tratament impuse tehnologic. Datele finale permit determinarea unui regim optim de procesare termică, atât ca durată cât și consum specific de energie;

5°) un *model matematic destinat simulării procesului de tratament termochimic de carburare*, în varianta de optimizare a duratei ciclului de tratament și a consumurilor, proces care implică transferul și difuzia masei de carbon din mediul atmosferei din cuptor la suprafața și în interiorul corpului solid al piesei supusă tratamentului. Sunt obținute cu anticipare informații privind evoluția în timp a difuziei carbonului în stratul de material supus îmbogățirii, a potențialului de carbon din atmosfera cuptorului în raport cu evoluția temperaturii din cuptor și din piesa de tratat și a consumului de fluide tehnologice necesare carburării complete în condițiile finale de tratament impuse tehnologic;

6°) un *model matematic destinat realizării funcției de reglare continuă* a parametrilor implicați în proces, pentru un sistem de reglare PID cu autoacordare prin funcții de identificare și autoadaptiv în timp real, cu comandă *gradual-continuu* a puterii electrice de încălzire, în acord cu necesarul de putere la momentul respectiv al ciclului de încălzire.

Acest ansamblu de modele matematice constituie baza algoritmului de elaborare a programului integrat, denumit **TRATERM**. Programul este divizat în *module operaționale (subprograme)* ce pot fi rulate independent. Modulele din aval utilizează datele rezultate prin rularea modulelor din amonte salvate în fișiere alocate fiecărui modul. Programul în ansamblu este deservit de o *structură de fișiere* pentru materiale, repere tehnologice, suport și dispozitive de susținere șarjă, distribuție și transport șarjă.

Din cauza diversității extrem de mari a variantelor constructive ale cuptoarelor electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare, a destinațiilor lor tehnologice și a gamei practic de nedefinit pentru reperele tehnologice (prin formă geometrică, dimensiuni și natură materială) a fost necesară *limitarea domeniului de abordare* așa cum a fost specificat și motivat în **capitolul I**. Totodată interesul este de a conserva cât mai mult din datele constructive reale, ale cuptorului și șarjei, precum și a celor de exploatare a cuptorului, pentru ca rezultatele simulării să constituie elemente de încredere pentru construcția unui ciclu optim și garantat calitativ în procesarea reală. Sunt considerate următoarele elemente în crearea modelului matematic de proces:

a) *tipurile de cuptoare disponibile a fi modelate și testate sunt cuptoarele de tip cameră (paralelipipedice) și verticale (cilindrice), cu vatră fixă, pentru temperaturi de funcționare până la 1200°C*, încălzite prin rezistoare metalice configurate pe pereții laterali ai cuptorului;

b) *destinația tehnologică* a acestor cuptoare este tratamentul termochimic de carburare, în mediu gazos compus din atmosfera protectoare de tip endotermic

îmbogățită în carbon prin adaus de gaz metan desulfurat, în vederea cementării prin călire în ulei;

c) șarja este *stabilă* pe vatra cuptorului, iar modul de șarjare-deșarjare este *discontinuu*. Acest regim de exploatare a cuptorului este cel utilizat în prezent din considerente de flexibilitate în exploatare însă cu implicații de natură energetică (cuptorul este supus periodic unor regimuri tranzitorii care țin de cantitatea și natura șarjei, precum și de referința de tratament ce poate diferi semnificativ de la o șarjă la alta);

d) rezistoarele utilizate sunt de *tip metalic*, în trei variante constructive și în configurare care să asigure o duranță optimă în exploatare și maximum de eficiență în transferul fluxului termic prin radiație spre șarja de încălzit;

e) șarja este *omogenă*, constituită din *piese divizate distribuite ordonat pe dispozitive sau dezordonat în coșuri* amplasate pe suportți metalici în diferite moduri de configurare. Șarja brută este constituită din *masa netă*, formată din reperele tehnologice de tratat și din "*masa balast*" constituită din dispozitive și suportți din materiale refractare. Caracteristica principală a reperelor care se tratează este cea de *termic subțire* ( $Bi < 0,2$ ), ceea ce impune un mod specific de generare a modelului termic de șarjă și a modului de tratare a fenomenelor de transfer termic, exclusiv de suprafață;

f) modul de exploatare obișnuit, pentru cuptoare cu regim de funcționare discontinuu, este acela în care *operațiile de șarjare-deșarjare se efectuează la cald*, cuptorul fiind adus sau menținut anterior la temperatura de tratament sau la o temperatură apropiată de aceasta. Temperatura inițială a șarjei, în momentul anterior introducerii în cuptor este cel mai adesea cea a mediului ambiant;

g) cuptoarele moderne pot fi asimilate cu *sisteme de reglare de ordinul 2*, respectiv cu două capacități concentrate. O exploatare optimă, raportată la consumuri energetice și calitativ tehnologice, o constituie implementarea unei bucle de reglare autoadaptive, capabilă să asigure prin comanda numerică o *dozare continuă a puterii electrice*, în acord cu necesarul de putere la fiecare moment de timp și care să permită autoacordarea dinamică a parametrilor funcției de reglare în raport cu nivelul perturbațiilor, frecvența și durata lor în timpul derulării ciclului de tratament;

h) *regimul actual de funcționare* al cuptoarelor în exploatarea industrială este cu controlul temperaturii și al conținutului de carbon după informația prelevată într-un punct de măsură fixat constructiv, prin instrumente de măsură care realizează o conversie în semnal electric a temperaturii, respectiv a conținutului de carbon. Ciclul de tratament se realizează în timp prin menținerea parametrului de proces controlat la unul sau mai multe paliere indexate manual. În scopul trecerii la utilizarea calculatorului de proces la procesări tehnologice cu programe de optimizare, se impune realizarea prin simulare a unui regim de conducere după evoluția parametrului de proces în piesa supusă tratamentului termic, soluție ideală pentru un tratament de calitate și cu consumuri specifice minime, controlabile și reproductibile;

i) un ciclu obișnuit de tratament, într-un cuptor electric cu rezistoare, este cu regim de încălzire neimpus, *fără restricții privind gradientul de temperatură* la suprafața șarjei. În general faza de încălzire este urmată de un timp de menținere la palierul de temperatură, prescris tehnologic, în scopul realizării unor transformări în structura materialului. Unele tratamente termice impun o fază de răcire de la temperatura de tratament la o temperatură inferioară, din

considerente tehnologice, operație realizată cel mai frecvent prin răcire naturală a ansamblului cuptor-șarjă generată de pierderile cuptorului.

Modelul matematic și algoritmul de programare a procesului de încălzire a șarjei, prezintă particularitatea unui *transfer termic preponderent prin radiație termică*, specific cuptoarelor electrice cu rezistoare în care se realizează tratamente la temperaturi ridicate, la care densitatea fluxului de putere pe unitatea de suprafață a peretelui interior cuptorului este deasemeni ridicată. Funcția de transfer termic prin radiație, așa cum a fost dezvoltată în cap. II, este puternic dependentă de temperatura rezistorului și de *factorul de vedere* între suprafața emițătoare și cele receptoare din incinta cuptorului. Dat fiind importanța acestui factor de vedere la simularea procesului de încălzire, precum și influența pe care o poate avea asupra rezultatelor simulării incorectitudinea determinării lor, în structura programului de simulare a fost creată o procedură de determinare prin *calcul a integralelor duble de contur* a acestui factor, în condiții de configurare geometrică identică cu cea din cuptorul real.

## III.2 FUNCȚIILE, CARACTERISTICILE ȘI STRUCTURA PROGRAMULUI **TRATERM**

### III.2.1 Destinația și funcțiile programului **TRATERM**

Programul **TRATERM** este destinat *optimizării ciclurilor tehnologice* de tratament termic realizat *în cuptoare industriale de temperaturi ridicate, încălzite indirect prin rezistoare*. Programul servește ca instrument de investigare a caracteristicilor și a performanțelor termice și energetice de proiectare și de execuție a cuptoarelor, precum și a posibilităților de exploatare în diferite regimuri bazate pe criterii de optimizare, a productivității, a consumurilor specifice de energie electrică și de fluide tehnologice. Acest program constituie un instrument util de proiectare și de pregătire tehnologică.

*Funcțiile principale ale programului sunt;*

a) *Testarea prin modelare a performanțelor termice globale, statice și dinamice, ale cuptorului. Datele obținute prin rularea în întregime a subprogramului constituie elemente ale unei structuri de bilanț global pentru un "cuptor gol", fără șarjă. Totodată sunt generate funcții matematice de variație ale pierderilor și a conductanței termice în concordanță cu temperatura de testare;*

b) *Testarea prin modelare a caracteristicilor nominale și disponibilităților termice ale instalației electrice de încălzire prin rezistoare. Datele obținute prin rularea în întregime a subprogramului destinat determinării caracteristicilor instalației de încălzire constituie bază de date pentru simularea procesului de transfer termic și stabilește funcțiile de variație a temperaturii rezistorului în raport cu temperatura cuptorului și a fluxului termic disipat;*

c) *Modelarea tipurilor de șarje divizate, distribuite ordonat sau în vrac, pe baza unor criterii de similitudine care să conserve cât mai fidel caracteristicile termice, geometrice și de masă ale șarjei reale;*

d) *Determinarea factorilor geometrici de vedere și a conductanțelor specifice transferului termic prin radiație în funcție de modul de configurare a șarjei și de reproducere exactă a situației reale de amplasare a pieselor;*

e) *Simularea diferitelor regimuri opționale tehnologic și a diferitelor posibilități de reglare a puterii de încălzire, sub control de autoacordare și autoadaptare optimală a funcției de reglare. Prin subprogramul de simulare sunt*

obținute grafice privind evoluția în timp a temperaturii în două puncte din șarjă (la suprafață și în centru), a temperaturii elementului rezistiv încălzitor, a temperaturii în punctul cald de măsură al termocuplului, a atmosferei din incintă, precum și a puterii electrice absorbite. Sunt determinate și afișate informații privind timpii aferenți diferitelor faze ale ciclului simulat, consumul total de energie electrică pe ciclu și consumul specific de energie electrică pe unitatea de masă a șarjei brute;

f) *Calculare de corecție* pas cu pas a mărimilor termofizice și electrice de material care suferă variații semnificative cu temperatura, precum și *verificarea criteriilor de convergență și de stabilitate* a soluțiilor determinate prin iterații repetitive, la fiecare pas de timp.

Programul **SIMUL-CARB** este destinat simulării procesului de carburare în mediu gazos a pieselor metalice supuse tratamentului termic de cementare în scopul durificării superficiale pe o adâncime de strat prescrisă tehnologic. Acest program servește *optimizării ciclului de tratament termochimic de carburare*, pe baza unui algoritm propriu procesului de difuzie a carbonului în materiale metalice aliate cu un conținut inițial în carbon. Programul utilizează informațiile obținute prin rularea programului **TRATERM**, privind evoluția în timp a temperaturii în diferite zone ale șarjei și în cuptor și este conceput pentru a fi utilizat ca *program sursă pentru conducerea numerică a ciclului de tratament*.

În structura programului **TRATERM** a fost introdusă o subrutină pentru a realiza *identificarea și autoacordarea parametrilor funcției de reglare*, și de autoadaptare dinamică a acestor parametrii pe durata derulării ciclului de simulare a procesului de tratament termic. Această subrutină denumită **ADAPT T** este destinată a asigura o funcție de supraveghere, expertiză, predicție și corecție a procesului de reglare pe baza informațiilor achiziționate din proces.

### III.2.2 Componența și caracteristicile programului TRATERM

Meniul principal pentru **TRATERM** (executabile - \*.exe):

TRATERM-PROGRAMARE	- program executabil destinat modelării și simulării pas cu pas, pe module de operare
TRATFIS	- program executabil ce permite accesul în fișiere de date pentru completare, modificare sau ștergere
DATA	- program de setare dată calendaristică

Submeniul pentru **TRATFIS** (bază de date - \*.dbf):

MATIZOL	- stocare date materiale de izolație (marcă, furnizor, temp. max. de utilizare, masă volumică, căldură masică, conductivitate termică cu coeficienți specifici de variație după o lege exponențială, emisivitate).
FELMAT	- stocare date materiale metalice (marcă, furnizor, temp. max. de utilizare, masă volumică, căldură masică, conductivitate termică cu coeficienți specifici compoziției chimice și gradului de aliere, emisivitate).

REZMAT	- stocare date materiale metalice rezistive (marcă, furnizor, temp.max. de utilizare, încărcarea specifică max., masă volumică, căldură masică, conductivitate termică, rezistivitate electrică și coeficient de variație cu temp., emisivitate).
COMPMAT	- stocare date pentru compoziția de aliere a materialelor metalice referitor la șarje, pe bază de normativ sau rețete de laborator.
FELSARJ	- stocare date pentru materiale metalice referitor la șarje (marcă, temp.max.de tratament, factor de aliere, coeficient de variație cu temp. a conductivității termice, emisivitate).
REPERE	- stocare date geometrice și tehnologice pentru repere de tip mărunț (bucși, role).
PIESUNI	- stocare date geometrice și tehnologice pentru repere de tip unibloc (ax rotor, piston).
ARBOR	- stocare date geometrice și tehnologice pentru repere de tip divizat distribuit ordonat (tije, arbori).
DISPOZ	- stocare date geometrice și de material pentru dispozitive de șarjare-deșarjare.
COS	- stocare date geometrice și de material pentru suporti piese mărunte (în coș).
GRILAJ	- stocare date geometrice și de material pentru suporti de distribuție ordonată.

Subprograme în **TIATERM** ( surse - \*.pas):

MODECAM	- unit pentru modelare cuptoare tip cameră și determinare caracteristici termice și energetice.
MODEVER	- unit pentru modelare cuptoare tip vertical și determinare caracteristici termice și energetice.
CALC_REZ	- unit pentru modelare instalație de încălzire și determinare caracteristici nominale și disponibile.
MODSARJA	- unit pentru modelare diferite tipuri de șarjă, pe criterii de similitudine.
CALCFV (PLP, CUV, PTR)	- unit pentru calculul factorilor de vedere geometrici pe tipuri de șarje și mod de configurare.
SIMULUNI	- unit pentru simulare încălzire piesă unibloc.
SIMULPLP	- unit pentru simulare încălzire piese mărunte modelate în plăci dreptunghiulare paralele.
SIMULCUV	- unit pentru simulare încălzire piese mărunte modelate în cuve dreptunghiulare concentrice.

SIMULPTR	- unit pentru simulare încălzire piese tip arbore distribuite ordonat modelate în rețea de prisme triunghiulare uniform distribuite.
SIMPRG	- unit pentru programarea regimurilor de simulare a procesului de încălzire-răcire șarje;
PROSAVE	- unit pentru calcule iterative de simulare a procesului de încălzire-răcire;
TRATERM	- unit pentru funcții și proceduri de uz general.
DATEGEN	- unit pentru generare matrici și calcule matematice.
PROCGEN	- unit pentru funcțiile principale ale programului
PROG	- unit pentru apelare proceduri de programare și de stabilire a meniurilor și submeniurilor.
AFI	- unit pentru generare ecrane de comunicare și afișare date.
PAS1..PAS5	- unituri pentru compilare în TP6 sub tpcx
TOT1..TOT3	- unit pentru apelarea unitului Overlay în TP 6.0
DBF1	- unit pentru creare fișiere bază de date

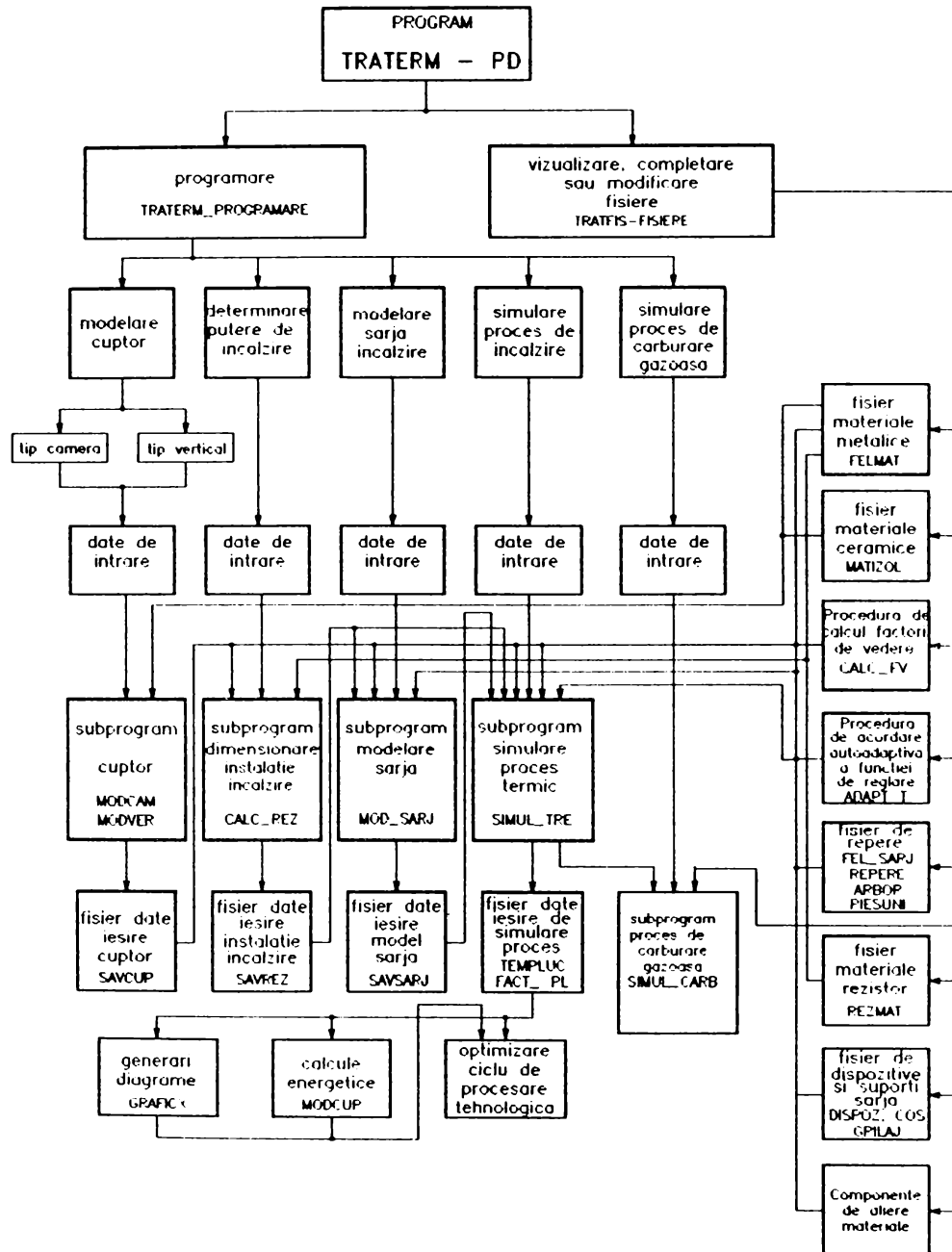
Subprogram de generare grafice în TRATERM ( surse - \*.pas):

GRAPHIX	- unit pentru generare grafice și imagini.
GRAPH2D	- unit din Turbo Pascal 6.0

Salvare date pe DISK (fișiere - \*.tmp):

SAVCUP	- salvare opțională de date în urma rulării subprogramului MOD_CUP
SAVREZ	- salvare opțională de date în urma rulării subprogramului CALC_REZ
SAVSARJ	- salvare opțională de date în urma rulării subprogramului MOD_SARJ
SAVFV	- salvare opțională de date în urma rulării subprogramului CALC_FV
TEMPLUC	- salvare opțională de date în urma rulării subprogramului SIMULARE (temperaturi)
FACTPL	- salvare opțională de date în urma rulării subprogramului SIMULARE (putere electrică)

III.2.3 Structura de bază a programului TRATERM





### III.3 FUNCȚIILE ȘI STRUCTURA SUBPROGRAMULUI MOD\_CUP

#### III.3.1 Destinația și funcțiile subprogramului MOD\_CUP

Subprogramul este *destinat testării performanțelor termice* globale, statice și dinamice, ale cuptoarelor electrice industriale cu încălzire indirectă prin rezistoare.

Tipurile constructive de cuptoare posibile de *modelat și supuse testării prin simulare*, prin subprogramul MOD\_CUP, sunt cuptoarele cameră sau cilindric verticale, cu vatră fixă, pentru tratamentul termic sau termochimic sub atmosfere controlate.

*Funcțiile principale* ale subprogramului sunt:

a) *Determinarea fluxului termic prin conducția fiecărui perete* de cuptor în parte, în regim staționar, corectate cu pierderile suplimentare produse de eventualele scurtcircuite termice, precum și controlul compatibilității materialelor și grosimilor de strat prescrise, funcție de temperaturile rezultate în fiecare strat de izolație în raport cu limitele prescrise de furnizor;

b) *Determinarea pierderilor totale ale cuptorului* prin suplimentarea pierderilor prin izolație cu pierderile comune ansamblului cuptorului, provocate de *traversarea pereților cu axe metalice* (ax agitator, borne ș.a), prin *introducerea atmosferei* tehnologice de tratament care este cu o temperatură la intrare apropiată de cea a mediului ambiant, *radiațiilor* prin orificii, uși sau capace deschise, prin *etanșări* ș.a.;

c) *Determinarea funcțiilor de variație a pierderilor totale și a conductanței termice globale* ale cuptorului în raport cu diferența de temperatură între interiorul și exteriorul cuptorului;

d) *Determinarea consumului de energie al cuptorului prin acumulări* în izolație, în structura metalică și ceramică suplimentară din construcția cuptorului, precum și a capacităților termice în fiecare strat de izolație a peretelui cuptorului și a *inerției termice* a cuptorului gol fără șarjă;

e) *Determinarea timpilor* de atingere a regimului termic staționar și a timpului până la prima încălzire la fața rece a peretelui, precum și *consumurile de energie electrică*, în funcție de timp;

f) *Determinarea funcției de răcire naturală* a cuptorului, fără șarjă și a caracteristicilor dinamice ale cuptorului gol, fără șarjă (*timp mort, constantele de timp*), asimilând cuptorul ca un proces de ordinul doi, *factorul de amplificare, pulsația naturală, perioada de oscilație*;

g) *Determinarea regimului optim de menținere cuptor în stare caldă*, în regim de așteptare, la o temperatură inferioară temperaturii de tratament a cuptorului, fără șarjă precum și informarea operatorului privind oportunitatea introducerii unei șarje pentru tratament la o oră care se apropie de *ora de modificare a tarifului energiei electrice*.

#### III.3.2 Precizări privind algoritmul de programare pentru subprogramul MOD\_CUP.

În raport cu obiectivele lucrării, *testarea performanțelor cuptorului se determină la regimul termic staționar* la o temperatură sau un domeniu de temperaturii utilizate în exploatare. În cadrul algoritmului de programare au fost

introduse următoarele elemente referitoare la aplicarea unor proceduri de calcul și de aproximare a unor funcții cu una sau mai multe variabile:

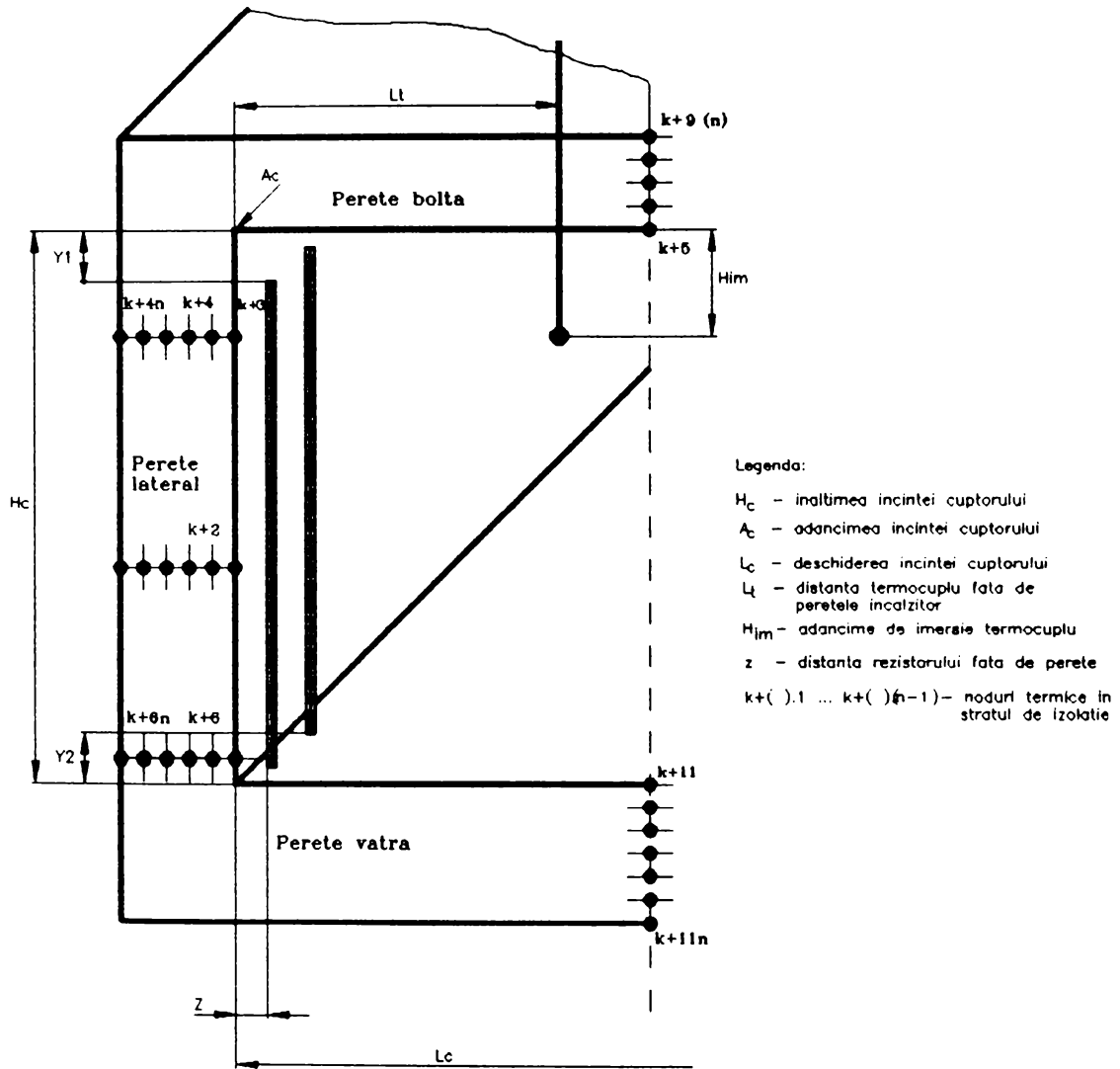


Fig.3.1 Pereții izolatori ai unui cuptor tip cameră

## a) referitor la proceduri:

- *structura de izolație a pereților cuptorului conține până la 4 straturi din materiale de natură diferită, legate între ele prin cleiuri sau mortaruri, fiind neglijate eventualele rezistențe termice de contact. Fiecare strat de izolație a fost împărțit în 4 incrementi liniari egali. Pentru calculul temperaturilor s-a utilizat *formularea explicită a temperaturilor* în fiecare nod termic, rezultate din ecuațiile de bilanț termic în fiecare nod (Fig 3.2). Pentru schimbul termic prin radiație la suprafață s-a considerat doar cel de la peretele exterior [56,86]. Procedura de calcul numeric al sistemului de ecuații rezultat este cea de *calcul iterativ* după metoda Gauss-Seidel [13,56,98,99,101,103]. Pentru a asigura *stabilitatea soluțiilor* a fost introdus un criteriu de verificare, prin determinarea la fiecare pas de timp a constantelor de timp, în fiecare nod termic și de corectare a incrementului de timp pentru pasul de timp ulterior, la o valoare mai mică decât cea mai mică constantă de timp determinată în pasul de timp curent [56,68,75,98]. Pentru a asigura *convergența soluției* s-a adoptat controlul valorii fluxului termic într-un nod calculat la doi pași succesivi de timp [95];*

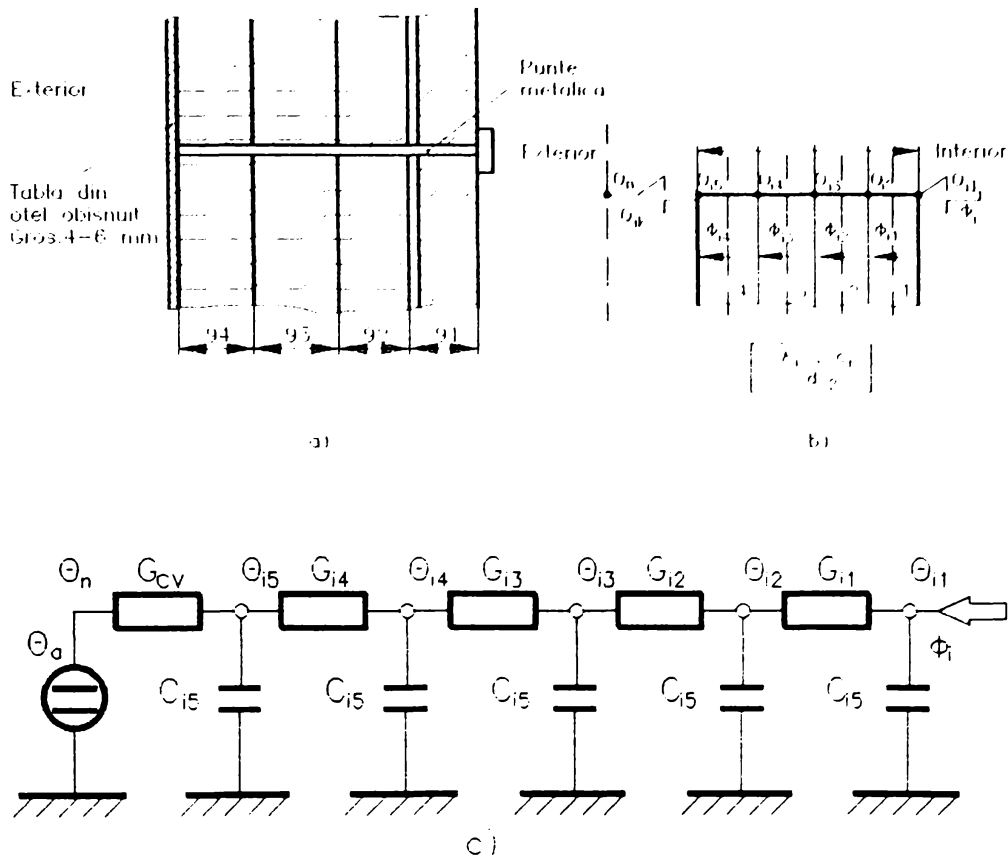


Fig 3.2 Discretizarea unei structuri de perete

- pentru determinarea pierderilor totale prin pereții cuptorului s-a introdus o formulă de corecție procentuală a pierderilor prin fiecare perete, *funcție de suprafața scurtcircuitelor termice* raportate la suprafața peretelui [12]. Pierderile suplimentare ale cuptorului au fost determinate global și adăugate

pierderilor prin conducția pereților. În calculul pierderilor prin borne s-a ținut cont atât de pierderile provocate prin conducția termică cât și cele prin conducția electrică. Pentru determinarea funcției de variație a pierderilor globale ale cuptorului, a conductanței termice globale și a constantelor de timp ale cuptorului s-a utilizat *procedura de interpolare polinomială* prin tehnica celor mai mici patrate, pentru 10 valori calculate ale pierderilor globale ale cuptorului determinate pentru 10 mărimi ale temperaturii de testare egal distanțate în domeniul de la 100% la 70% față de temperatura nominală [12,13];

- pentru calculul *energiei acumulate și a timpilor de atingere a regimului staționar* s-a utilizat procedura de integrare a pierderilor, în domeniul  $[0, +\infty]$ , prin regula trapezului [52];

- pentru determinarea *timpului mort echivalent* s-a utilizat o formulă, verificată experimental, de împărțire a inerției termice a cuptorului la conductanța termică globală, determinată la temperatura de testare [38,44,52].

- pierderile prin conducția termică a pereților, energia acumulată în izolație, capacitățile termice concentrate și timpii de atingere a regimului staționar se determină *pentru fiecare perete* (perete lateral, vatră, boltă, ușă sau capac) (vezi Fig.3.1).

**b) referitor la aproximarea modului de variație a unor mărimi termofizice:**

- *conductivitatea termică a materialelor ceramice* de izolare se aproximează ca o variație de tip exponențial cu temperatura și o variație de tip linear cu conținutul procentual de  $H_2$  în atmosfera din cuptor [12];

- *conductivitatea termică a materialelor metalice* se aproximează ca o variație de tip polinomial de grad doi cu temperatura și ponderată procentual cu diferitelor componente de aliere în structura materialului [80];

- *căldura masică a materialelor metalice* se aproximează ca o variație de tip linear cu temperatura [12,87];

- *pierderile globale ale cuptorului, conductanța termică globală și curba de răcire naturală* a cuptorului se aproximează cu funcții de tip exponențial;

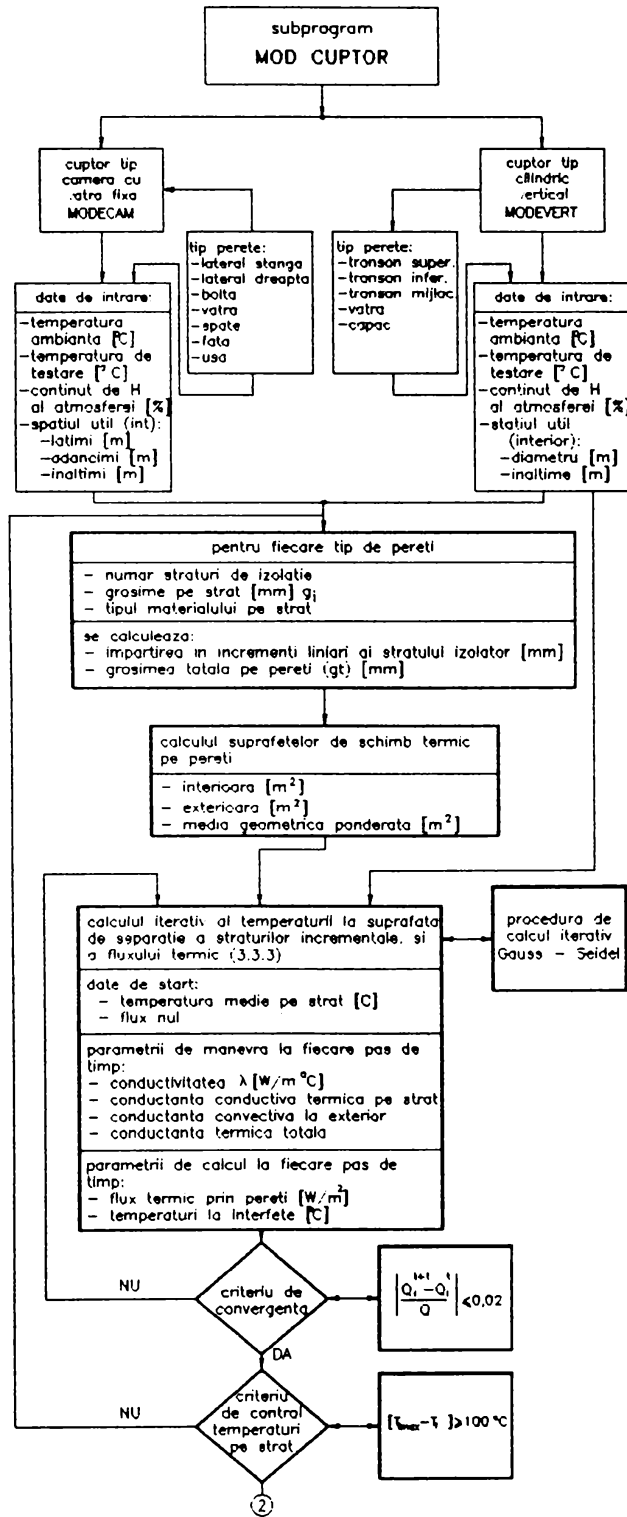
- *energia acumulată* se aproximează cu o integrală a pierderilor globale ale cuptorului pe un interval infinit de timp.

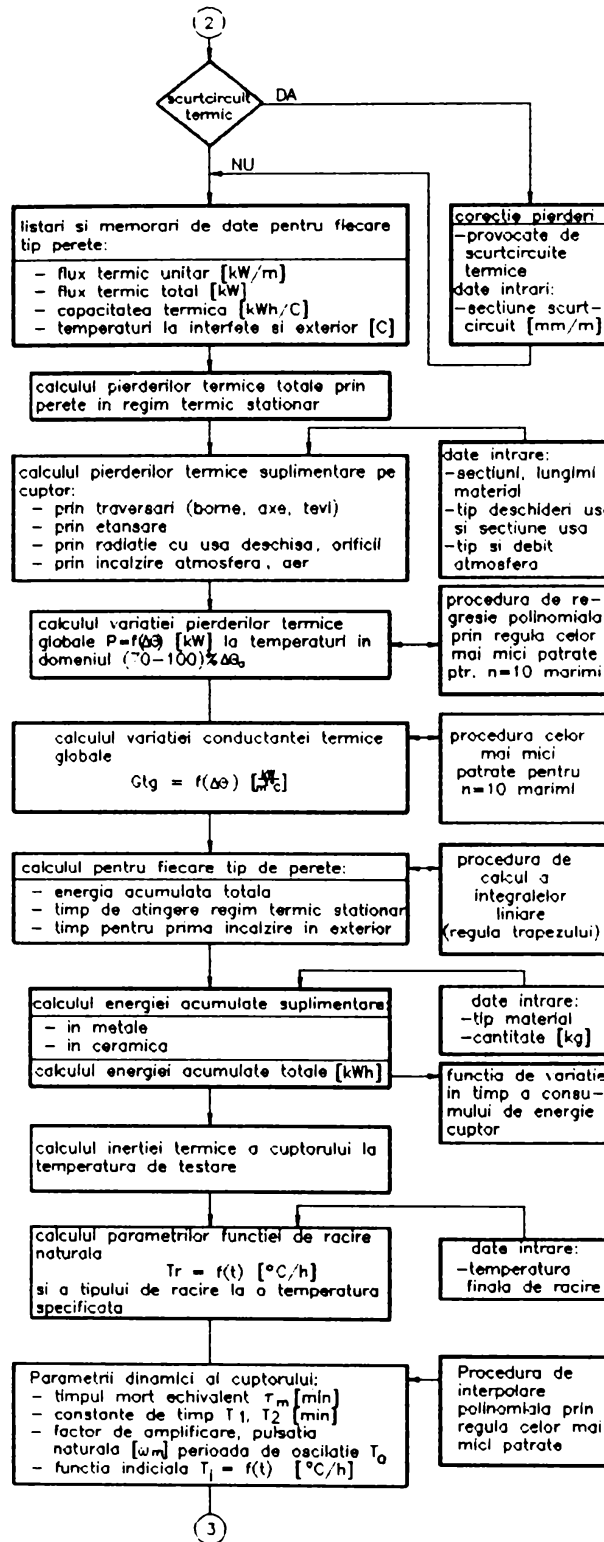
**c) referitor la invariabilitatea unor mărimi:**

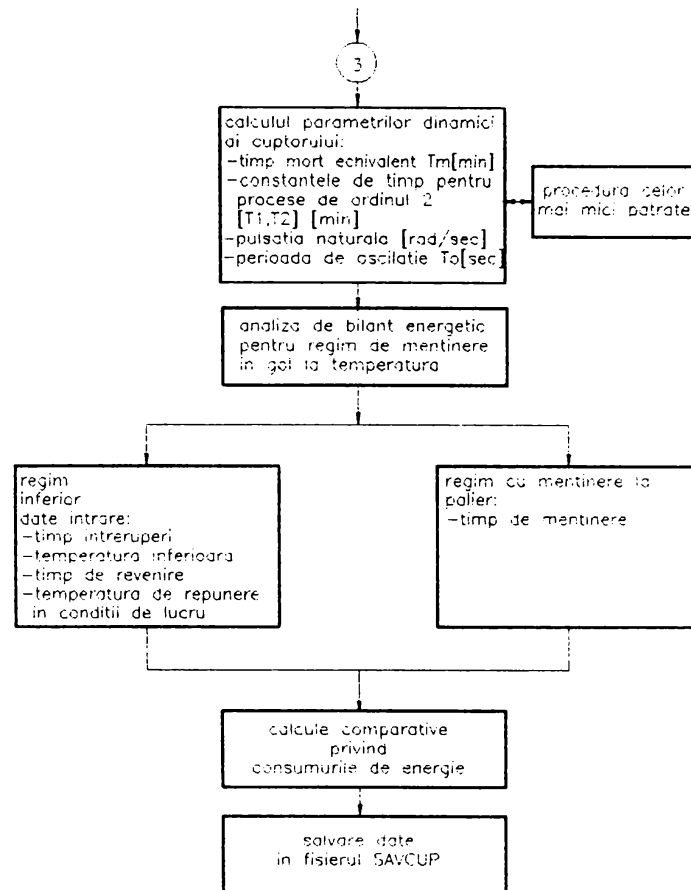
- *masa volumică și emisivitatea materialelor* din cuptor nu prezintă variații semnificative cu temperatura, ele fiind considerate constante [12,56,98,101];

- *căldura masică a materialelor ceramice* are o variație foarte mică cu temperatura și poate fi considerată constantă pe un anumit domeniu de temperaturi [64,87,91].

### III.3.3 Structura și algoritmul de programare pentru subprogramul MOD\_CUP.







### Date de intrare

Tipul de cuptor (cameră sau vertical)  
 Simbol cuptor  
 Dimensiunile spațiului interior:  
 - Deschidere ( $L_c$ ) [**m**]  
 - Adâncime ( $A_c$ ) [**m**]  
 - Înălțime ( $H_c$ ) [**m**]  
 Temperatura ambiantă  $\theta_a$  [**°C**]  
 Temperatura de testare  $\theta_c$  [**°C**] (max.1200°C)  
 Conținutul de hidrogen din atmosferă  $H_2$  [%] (20-50%)  
 Numărul de straturi izolatoare pe fiecare tip de perete (2-4)  
 Numărul de incremente pe strat,  $n_i$  (=4)  
 Grosimea fiecărui strat  $g_i$  [**mm**] și tipul materialului  
 Secțiunea scurtcircuitelor termice pe fiecare perete [**mm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>**]  
 Numărul bornelor și tipul de material  
 Lungime, diametru [**mm**], tensiunea de alimentare [**V**] și rezistența electrică[**Ohm**]  
 Numărul termocuplelor, axului motor, material și diametru [**mm**]  
 Tipul și debitul atmosferei controlate [**Nm<sup>3</sup>/h**]  
 Suprafața de deschidere ușă [**m<sup>2</sup>**] și timpul de deschidere ușă [**min**]

**Faza 1** Calculul fluxului termic prin pereți și a temperaturilor la interfețe între straturi incrementale:

**Pasul 1** Determinarea valorilor de start: pentru temperaturi între interfețe [12]:

$$\theta_i = \theta_c - [\theta_c - \theta_a] \frac{i}{n} \quad (3.1)$$

unde:  $i$  - numărul stratului;  
 $n$  - numărul total de straturi;

$$\theta_n = \theta_a + 30^\circ\text{C} \quad (3.2)$$

(conform normelor de protecția muncii);

Valoarea inițială a fluxului:

$$\dot{\Phi}^{t=0} = 0 \quad (3.3)$$

Dimensiunea incrementului liniar pe strat:

$$\Delta x = \frac{g_i}{n_i} 10^{-3} \quad [\text{m}] \quad (3.4)$$

unde:  $g_i$  - grosimea stratului izolator de același fel [mm];  
 $n_i$  - numărul de incremenți pe strat;

**Pasul 2** Calculul prin iterații succesive a temperaturilor la interfețele dintre straturi (procedura Gauss - Seidel):

În cadrul fiecărui increment de timp  $\Delta t_i$  se efectuează următorii pași: pentru fiecare nod termic  $i = 1 \dots n$

a) *Calcul de manevră*

- Calculul coeficientului de transfer termic prin conducție [56];

$$\lambda_{im}(\theta_i, \%H_2) = \lambda_0 \frac{e^{k_i\theta_i} - e^{k_i\theta_{i-1}}}{k_i(\theta_i - \theta_{i-1})} + p_{H_2} [10^{-2} + 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_i] \quad [\text{W/m}^\circ\text{C}] \quad (3.5)$$

unde:  $\theta_i, \theta_{i-1}$  - temperaturile la capătul intervalului  $\Delta x_i$  [ $^\circ\text{C}$ ];  
 $\Delta x_i$  - dimensiunea incrementului liniar din stratul "i" [mm];  
 $p_{H_2}$  - conținutul de hidrogen din atmosfera cuptorului [%];  
 $\theta_a$  - temperatura pe mantaua exterioară a cuptorului [ $^\circ\text{C}$ ];  
 $\theta_a$  - temperatura mediului ambiant [ $^\circ\text{C}$ ].

- Calculul *conductanțelor termice conductive* [75,98,101]:

- pentru *puncte nodale interioare* pe unitatea de suprafață:

$$G_{i,i+1} = \frac{\lambda_{im}(\theta_i)}{\Delta x_i} \quad [\text{W}/^\circ\text{C}] \quad (3.6)$$

- pentru *puncte nodale pe unitatea de suprafață interioară* a cuptorului:

$$G_{oi} = \frac{2 \lambda_{im}(\theta_c)}{\Delta x_i} S_i \quad [\text{W}/^\circ\text{C}] \quad (3.7)$$

- Calculul pentru *conductanțe termice convective* pe unitatea de suprafață exterioară a cuptorului [12,98,101]:

$$G_{c,n} = [8,24 + 0,058(\theta_n - \theta_a)] \Delta x_i \quad [\text{W}/^\circ\text{C}] \quad (3.8)$$



- Calculul *capacităților termice concentrate* corespunzătoare fiecărui nod termic masiv [56,75,98]

$$C_i = \gamma_i \Delta V_i c(\theta_i) \quad [\text{Wh}/^\circ\text{C}] \quad (3.9)$$

unde:

- $\gamma_i$  - masa volumică a materialului din stratul "i" [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ];
- $\gamma_i$  este majorat cu (1,1 - 0,8) pentru a fi luate în considerare și materialele de adaus pentru înzidire (cleiuri sau mortar) ( $\gamma_i = \text{const}$ ) [56];
- $c(\theta_i)$  - căldura masică medie corespunzătoare materialului [ $\text{Wh}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ] (=const.)

- Calculul *incrementului de timp* pentru pasul de timp următor [56,75]:

$$\Delta t \leq \left( \frac{C_i}{3600 \sum_j G_{ij}} \right) = \tau_i \quad [\text{s}] \quad (3.10)$$

respectiv valoarea cea mai mică din șirul valorilor *constantelor de timp* corespunzătoare fiecărui nod termic,

- unde:  $C_i$  - capacitatea termică concentrată în nodul "i" [ $\text{Wh}/^\circ\text{C}$ ];
- $\sum G_{ij}$  - suma conductanțelor termice care concură în nodul "i" [ $\text{W}/^\circ\text{C}$ ];

b) Calculul iterativ al setului de ecuații pentru fiecare perete în parte exprimate în formă *explicită* al temperaturilor în fiecare nod termic al peretelui și utilizând procedura Gauss-Seidel [19]:

$$\theta_i^{t+1} = \theta_i^t + \frac{\Delta t^t}{C_i} \left[ \Phi_i + \sum_j G_{ij} (\theta_j^t - \theta_i^t) \right] \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.11)$$

respectiv ( $n \times n$ ) ecuații, la care se adaugă condițiile de singularitate:

- *condiții inițiale*: cele date la pasul 1;
- *condiții de frontieră*:

- pentru *peretele exterior*;

$$\theta_n^{t+1} = G_{cn} (\theta_n^t - \theta_a) \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.12)$$

- pentru *peretele interior*;

$$\theta_1^{t+1} = \theta_1^t + G_{0,1} (\theta_1^t - \theta_c) \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.13)$$

Valorile obținute sunt stocate în *matricea vector* a temperaturii, alocată peretelui respectiv,

$$[\theta^{t+1}]_i, \quad \text{unde } i = \text{indice perete}$$

**Pasul 3** Calculul fluxului prin pereți și verificarea criteriului de convergență:

- a) Se calculează *conductanța termică echivalentă* pentru fiecare perete,

$$G_{i0}^t = G_{cn}^t + \sum_{i=0}^n G_{i,1+i}^t \quad [\text{W}/^\circ\text{C}] \quad (3.14)$$

- b) *Fluxul termic prin punctele de rang "i"*:

$$\Phi_i^{t+1} = G_{ic}^t (\theta_i^t - \theta_n) \quad [\text{W}] \quad (3.15)$$

c) Criteriul de convergență [56.75]:

$$\left| \frac{\Phi_i^{t+1} - \Phi_i^t}{\Phi_i^t} \right| \leq 0,02 \quad (3.16)$$

Pasul 4 Cu valorile fluxului care îndeplinește condiția de convergență corespunzător ultimelor temperaturi calculate, se verifică:

Valorile temperaturilor calculate la interfețe între straturi în raport cu valoarea maximă de utilizare a materialului din strat (prescrisă de furnizori ca fiind cu cel puțin 100°C mai mică decât valoarea maximă admisibilă) [12]

$$|\theta_i^{\text{max}} - \theta_i^{t+1}| \leq 100^\circ\text{C} \quad (3.17)$$

Pasul 5 Se calculează fluxul termic total prin pereți

- a) Se calculează suprafața interioară a fiecărui perete,  $S_{\text{int}(i)}$  [m<sup>2</sup>] și suprafața exterioară a peretelui,  $S_{\text{ext}(i)}$  [m<sup>2</sup>] Suprafața echivalentă a peretelui ca medie geometrică:

$$S_i = \sqrt{S_{\text{int}(i)} S_{\text{ext}(i)}} \quad [\text{m}^2] \quad (3.18)$$

- b) Se calculează fluxul termic total prin peretele "i":

$$\Phi_{it} = \Phi S_i \quad [\text{W}] \quad (3.19)$$

Pasul 6 Corecția fluxului prin perete funcție de eventualele scurtcircuite termice (punți metalice sudate pe mantaua exterioară în legătură directă cu interiorul cuptorului):

$$\Phi_{sci} = S_{isc} \frac{(\theta_c^t - \theta_n^t)}{\Phi_i \sum g_i} \quad [\%] \quad (3.20)$$

unde:  $S_{isc}$  - secțiunea unitară a scurtcircuitelor termice pe peretele "i" [mm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>];

$\sum g_i$  - grosimea totală a peretelui "i" [mm].

Noua valoare corectată a fluxului termic prin peretele "i" este:

$$\Phi_{tci} = \Phi_{ti} \left( 1 + \frac{\Phi_{sci}}{100} \right) \quad [\text{W}] \quad (3.21)$$

NOTĂ: Calculul se repetă pas cu pas pentru fiecare tip de perete (i = 1 ... 6).

**Faza 2** Calculul pierderilor totale și a caracteristicii termice statice.

Pasul 7 Calculul pierderilor totale prin pereți:

$$\Phi_{tp} = \sum_{i=1}^m \Phi_{ti} \quad [\text{W}] \quad (3.22)$$

unde:  $\Phi_{it}$  - fluxul termic total prin peretele "i" [W];  
 $m$  - numărul de pereți.

### Pasul 8 Calculul pierderilor suplimentare

a) Calculul pierderilor prin traversări de borne:

$$\Phi_b = n_b S_b 10^{-6} \frac{[\theta_c - (\Delta\theta + \theta_a)]}{l_b} \quad [\text{W}] \quad (3.23)$$

unde:

$$S_b = \frac{\pi d_b^2}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad \text{- bornele circulare} \quad (3.24)$$

$$S_b = a \times b \quad [\text{mm}^2] \quad \text{- borne dreptunghiulare} \quad (3.25)$$

- creșterea în temperatură la partea exterioară a bornei circulare:

$$\Delta\theta = 0,007 d_b \theta_c + \frac{24}{d_b^3} \frac{U^2}{R_{20}[1 + \alpha \theta_a]} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.26)$$

unde:

$n$  - numărul total de borne;  
 $d_b$  - diametrul bornei [mm];  
 $U$  - tensiunea de alimentare pe bornă [V];  
 $R_{20}$  - rezistența la rece pe element [ $\Omega$ ];  
 $l_b$  - lungimea bornei [mm];  
 $\theta_c$  - temperatura de testare cuptor [ $^\circ\text{C}$ ].

- creșterea în temperatură la partea exterioară a bornei dreptunghiulare:

$$\Delta\theta = \frac{0,014 \theta_c}{\frac{1}{a} + \frac{1}{b}} + \frac{30}{ab(a+b)} \cdot \frac{U^2}{R_{20}[1 + \alpha \theta_c]} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.27)$$

unde:  $a$  - lățimea benzii [mm];  
 $b$  - grosimea benzii [mm].

b) Pierderi prin traversări de axe :

$$\Phi_{ax} = n_{ax} [24,4 + 1,16 \cdot 10^{-2}] (\theta_c + \Delta\theta_m) (\theta_c - \Delta\theta_m) \cdot 1,35 \cdot d_{ax}^2 \cdot 10^{-6} \quad [\text{W}] \quad (3.28)$$

unde:

- temperatura la exteriorul agitatorului sau bornei

$$(3.29) \quad \Delta\theta_m = 14,4 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_c^2 + 0,17 \cdot \theta_c + 35,4 \quad [^\circ\text{C}]$$

- temperatura la exteriorul tecii termocuplului

$$\Delta\theta_m = 5,6 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_c^2 + 0,2 \cdot \theta_c + 15,1 \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.30)$$

unde:  $d_{ax}$  - diametrul axului (ax motor sau termocuplu);  
 $n$  - numărul axelor de același fel;  
 $\theta_c$  - temperatura de testare a cuptorului [ $^{\circ}\text{C}$ ].

c) Pierderi prin încălzire atmosferă controlată ( formule obținute din date experimentale)[12]

- pentru atmosferă de tip *endogaz*:

$$\Phi_{iat} = (0,46 \cdot \theta_c - 81) \cdot D_a \cdot 10^{-3} \quad [\text{W}] \quad (3.31)$$

- pentru atmosferă de tip *exogaz*:

$$\Phi_{iat} = (0,43 \cdot \theta_c - 30) \cdot D_a \cdot 10^{-3} [\text{W}] \quad (3.32)$$

- pentru *azot*:

$$\Phi_{iat} = (0,4 \cdot \theta_c - 20) \cdot D_a \cdot 10^{-3} \quad [\text{W}] \quad (3.33)$$

unde:  $D_a$  - debitul de atmosferă [ $\text{Nm}^3/\text{h}$ ];  
 $\theta_c$  - temperatura în cuptor [ $^{\circ}\text{C}$ ];

d) Pierderi prin sistemul de etanșare uși sau capace [12]:

$$\Phi = (0,5 \cdot 10^{-5} \cdot \theta_c^2 - 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_c + 0,98) l_j \cdot 10^{-3} \quad [\text{W}] \quad (3.34)$$

unde:  $l_j$  - lungimea totală a jgheabului de etanșare [ $\text{m}$ ].  
 $\theta_c$  - temperatura în cuptor [ $^{\circ}\text{C}$ ];

e) Pierderi prin deschidere ușă sau capac:

$$\Phi_{du} = 0,9 \cdot 56,7 \cdot 10^{-12} \cdot S_{du} \cdot [(\theta_c + 273)^4 - (\theta_a + 273)^4] \Delta t \quad [\text{W}] \quad (3.35)$$

unde:  $S_{du}$  - secțiunea de deschidere [ $\text{m}^2$ ];  
 $\Delta t$  - timpul de deschidere [ $\text{min}$ ];  
 $\theta_c$  - temperatura cuptorului [ $^{\circ}\text{C}$ ];  
 $\theta_a$  - temperatura mediului exterior [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Pasul 9 Calculul pierderilor totale ale cuptorului la temperatura de testare  $\theta_c$

$$\Phi_{tot\ cup(\theta_c)} = \Phi_{tp} + \sum \Phi_{pierderi\ suplimentare} \quad [\text{W}] \quad (3.36)$$

Pasul 10 Determinarea caracteristicii statice (variația pierderilor funcție de temperatură)

Se adoptă o lege de variație de tip exponențial ai cărei parametri se determină prin *regula celor mai mici pătrate*.

$$P_{t\ cup} = P_0 \cdot \left( \frac{\theta_c}{\theta_a} - 1 \right)^A \quad [\text{W}] \quad (3.37)$$

unde:  $P_0$  și  $A$  sunt coeficienții determinați pentru  $n = 10$  valori ale pierderilor în intervalul (70÷100 %) din temperatura de testare.  
 Legea de variație se consideră precisă în intervalul  $\theta_c \div 0,7 \theta_c$ .

Pasul 11 Determinarea conductanței termice globale a cuptorului, ca o lege de variație exponențială. Utilizând procedura celor mai mici pătrate pentru 10 valori calculate pentru pierderi, la intervale egale de temperatură  $\Delta\theta = 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$G_{\text{gcup}}(\Delta\theta(t)) = \frac{P_{\text{cup}}(\Delta\theta(t))}{\Delta\theta} \quad [\text{W}/^{\circ}\text{C}] \quad (3.38)$$

reprezentând conductanța termică globală a cuptorului,

$$G_{\text{ucup}}(\Delta\theta(t)) = \frac{G_{\text{cup}}(\Delta\theta(t))}{S_{\text{totala}}} \quad [\text{W}/\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C}] \quad (3.39)$$

reprezentând conductanța termică globală raportată la suprafața de schimb cu exteriorul a cuptorului,

$$S_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^{\text{nr. perete}} S_{\text{sch}} \quad [\text{m}^2] \quad (3.40)$$

**Faza 3** Calculul energiei acumulate, a inerției termice și a capacităților termice ale pereților izolatori

Pasul 12 Calculul căldurii acumulate în regim staționar în fiecare perete "i" [44]

$$E_n = \int_0^{\infty} P_i(\theta) \cdot dt \quad [\text{Wh}] \quad (3.41)$$

unde:  $\theta = f(t)$  (3.42)

Se utilizează regula trapezului de aproximare a integralei

$$E_{i+1}^{t+1} = E_i^t + 0,5(P_i + P_{i+1})(t_{i+1} - t_i) \quad [\text{Wh}] \quad (3.43)$$

$$E_{ni} = E_i \frac{\Delta\theta_c}{\Delta\theta_c - \Delta\theta} \quad (3.44)$$

criteriul de convergență

$$\left| \frac{E_{ni} - E_i}{E_i} \right| \leq 0,1 \quad (3.45)$$

NOTĂ: Energia acumulată se calculează pentru fiecare tip de perete în parte ( $i = 1 \dots p$ ).

Pasul 13 Calculul timpului până la prima încălzire (momentul sesizării fluxului termic prin perete) și de atingere a regimului termic staționar pentru fiecare perete în parte (prin analogie cu un perete echivalent) [12].

a) Calcule de manevră de determinare a unor mărimi termice echivalente ale unui perete izolator cu un singur strat de izolare:

- coeficientul conductivității termice echivalentă a unui perete care conține un singur strat:

$$\lambda_{\text{ech}} = \frac{G_{\text{ech}}}{\sum g_i} \cdot 10^{-3} \quad [\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{C}] \quad (3.46)$$

- se calculează produsul ( $\gamma c$ ) echivalent al unui perete care conține un singur strat :

$$R_{0c} = \frac{E_{c\text{ai}} \cdot 2000}{[(\theta_c + \theta_a) - 2\theta_a] \sum g_i} \quad [\text{Wh}/^\circ\text{Cm}^3] \quad (3.47)$$

- se calculează raportul între suprafața și difuzivitate ( $g^2/a$ ):

$$L_{2A} = \frac{R_{0c} \cdot (\sum g_i)^2}{1000 \cdot \lambda_{\text{ech}}} \quad [\text{h}] \quad (3.48)$$

- se calculează difuzivitatea echivalentă a peretelui ( $a_{\text{ech}}$ ):

$$\text{HHH} = \frac{0,001 \cdot \lambda_{\text{ech}}}{R_{0c}} \quad [\text{m}^2/\text{h}] \quad (3.49)$$

- conductanța termică la exteriorul cuptorului:

$$G_{\text{cvi}} = \alpha_c \cdot S_{\text{text}} \quad (3.50)$$

- b) Calculul timpului până la prima încălzire pe fața rece a peretelui [12]:

$$t_{11} = 0,0885 \cdot L_{2A} \quad [\text{h}] \quad (3.51)$$

calculat din egalitatea pierderilor.

- c) Calculul timpului până la atingerea regimului staționar [12]:

$$t_{\text{sti}} = 0,207 \cdot L_{2A} \left( 1 + 2\lambda_{\text{ech}} \frac{\sum g_i}{G_{\text{cvi}}} \right) \quad [\text{h}] \quad (3.52)$$

calculat din egalitatea energiilor acumulate în peretele real și cel echivalent.

Pasul 14 Calculul energiei acumulate suplimentar [12]

- a) Prin metal (rezistori, căi cu role, construcții metalice interioare)

$$\dot{E}_{\text{am}} = M_m c_m (\theta_c - \theta_a) \quad [\text{Wh}] \quad (3.53)$$

- b) Prin ceramică (suportți șarjă, suport rezistori ș.a.)

$$\dot{E}_{\text{ac}} = M_c c_m (\theta_c - \theta_a) \quad [\text{Wh}] \quad (3.54)$$

unde: M - masa [kg];

$$c_m = c \left( \theta_m = \frac{\theta_c + \theta_a}{2} \right) - \text{căldura masică medie} \quad [\text{Wh}/\text{kg}^\circ\text{C}]. \quad (3.55)$$

Pasul 15 Calculul energiei totale acumulate de cuptor

$$E_{\text{atot}} = \sum E_{\text{ai}} + \sum (E_{\text{am}} + E_{\text{ac}}) \quad [\text{Wh}] \quad (3.56)$$

Pasul 16 Calculul inerției termice și a capacităților termice pe strat.

Capacitatea termică pe fiecare strat izolator

$$I_{th} = \frac{E_{atot}}{\theta_c - \theta_a} \quad [\text{Wh}/^\circ\text{C}] \quad (3.57)$$

$$C_i = \frac{E_{ai}}{\theta_i - \theta_a} \quad [\text{Wh}] \quad (3.58)$$

Faza 4 Determinarea caracteristicii (curbei) de răcire

$$\theta_r(t) = \theta_a \left[ \Delta t \frac{P_0(A-1)}{I_{th}\theta_a} + \left( \frac{\theta_c}{\theta_a} - 1 \right)^{1-A} \right]^{\frac{1}{1-A}} + 1 \quad [^\circ\text{C}/\text{h}] \quad (3.59)$$

unde:  $\theta_r$  - temperatura în cuptor după scurgerea unui timp de răcire naturală;

$\Delta t$  - increment de timp [h];

$P_0, A$  - coeficienții funcției de aproximare a pierderilor termice prin pereți

Criteriul de stop al calculului curbei de răcire este  $|\theta_c(t) - \theta_r| \leq 25^\circ\text{C}$  (3.60)

Incrementul de timp  $\Delta t$  se corectează în funcție de viteza de răcire:

- pentru prima oră:

$$\Delta t_1 = 10 \text{ min};$$

- pentru următoarele două ore:

$$\Delta t_2 = 1 \text{ oră};$$

- pentru mai mult de două ore:

$$\Delta t_2 = 2 \text{ ore};$$

$$t_r = n_1 \Delta t_1 + n_2 \Delta t_2 + n_3 [\Delta t_3] \quad [^\circ\text{C}]. \quad (3.61)$$

Faza 5 Calculul consumului de energie pentru fiecare perete în parte [12]:

a) Dacă  $t < t_1$  (timpul până la prima încălzire a feței reci):

$$E_{cpi} = R_{oc}(\theta_c - \theta_a) 1,12 \sqrt{\frac{S_{ech} t}{1000}} 10^{-3} \quad [\text{Wh}/\text{h}] \quad (3.62)$$

b) Dacă  $t_1 < t < t_2$  (timpul până la atingerea regimulstaționar):

$$E_{cpi} = \frac{R_{oc} \left[ (\theta_c - \theta_a) \sum g_i \left( 1 - \frac{2}{3} \exp\left[0,241 \left( 1 - \frac{t}{t_1} \right) \right] \right) \right]}{1000} 10^{-3} \quad [\text{Wh}/\text{h}] \quad (3.63)$$

c) Dacă  $t > t_2$  (un timp după atingerea regimului staționar):

$$E_{cpi} = R_{oc} \left[ \frac{(\theta_c - \theta_a) \sum g_i 0,293 \left( 1 + \frac{\lambda_{ech}}{\sum g_i G_{cv}} \right)}{1000} + \frac{(\theta_c - \theta_a) \lambda_{ech} \left( 1 - \frac{\lambda_{ech}}{\sum g_i G_{cv}} \right) \frac{t}{\sum g_i}}{1000} \right] 10^{-3} \quad [\text{Wh}] \quad (3.64)$$

### Faza 6 Calcul de eficiențe energetice în exploatare privind menținere la temperatură fără șarjă [44]

Se specifică:

- timp de menținere gol,  $t_m$  [h];
- temperatura de menținere,  $\theta_m$  [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- temperatura de revenire pentru regim,  $\theta_r$  [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- timpul de repunere în regim,  $t_r$  [h];

a) Se calculează *timpul de răcire naturală*  $t_r$  [h], ca la faza 4;

b) Se calculează *consumul de energie pe durata menținerii* la  $\theta_m < \theta_c$

$$E_{cm} = t_m P_{cup}(\theta_m) \quad [\text{Wh}] \quad (3.65)$$

c) Se calculează *consumul de energie pe durata repunerii la temperatura de regim*:

$$E_{crp} = t_{rv} P_{med} \quad [\text{Wh}] \quad (3.66)$$

unde:

$$P_{med} = \frac{P_0 \theta_a}{\theta_r - \theta_m} \frac{1}{A + 1} \left[ \left( \frac{\theta_r}{\theta_a} - 1 \right)^{A+1} \left( \frac{\theta_m}{\theta_a} + 1 \right)^{A+1} \right] \quad [\text{W}] \quad (3.67)$$

d) Se calculează *consumul de energie prin menținere cuptor gol în așteptare la o temperatură*  $\theta_m < \theta_c$

$$E_{c1} = E_{cm} + E_{crp} \quad [\text{Wh}] \quad (3.68)$$

e) Se calculează *consumul de energie prin menținere cuptor gol la temperatura*  $\theta_c$

$$E_c = (t_r + t_m + t_{rv}) P_{cup}(\theta_c) \quad [\text{Wh}] \quad (3.69)$$

f) Se analizează cele două consumuri și se decide *regimul de menținere cuptor în gol* (durata și temperatura optimă).

### Faza 7 Calculul parametrilor dinamici ai cuptorului [44]

Pasul 17 Se identifică timpul mort al cuptorului. Pentru aceasta se utilizează datele memorate în fișier pentru temperaturile  $\{\theta_i\}$  pe durata de timp  $t=20$  minute cu incrementul de timp  $\Delta t=30\text{sec}$ .

Se calculează diferențialele [44]:

$$D_i = \frac{\Delta \theta_{0i}^{t+1} - \Delta \theta_{0i}^{t-1}}{2 \Delta t} \quad [^{\circ}\text{C/s}] \quad (3.70)$$

unde:  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ , ( $i = 2, 3, \dots$ )  $t_1 > 100$  sec,  $\Delta \theta = \theta_0 - \theta_a$   
 $\theta_{0i}$  - temperatura măsurată la momentul de timp "i".

Se calculează timpul:



$$t_{oi} = t_i - \frac{\Delta \theta_{oi}}{D_i} \quad (3.71)$$

Se construiește șirul  $(t_{oi})$  și se verifică  $t_{oi} > t_{oi-1}$  (3.72)

Dacă este adevărat se trece mai departe, dacă nu, se determină din relația

$$t_{oi} < t_{oi-1}, \quad (3.73)$$

rezultând  *timpul mort echivalent al cuptorului fără șarjă:*

$$\tau_{mc} = t_{oi-1} \quad (3.74)$$

În lucrare, deoarece se consideră cuptorul adus inițial în regim staționar și deoarece timpul mort echivalent este valabil doar în jurul valorii de funcționare a cuptorului, utilizăm o formulă verificată experimental [39,44]:

$$\tau_m = \frac{I_{th}}{G_g(\theta_c)} \frac{1}{60} \quad [\text{min}] \quad (3.75)$$

unde:  $I_{th}$  - inerția termică a cuptorului [Wh/°C];  
 $G_g(\theta_c)$  - conductanța termică globală a cuptorului la temperatura de testare [W/°C].

Pasul 18 Se determină constantele de timp ale procesului, estimat de ordin 2 și ale funcției de răspuns, estimată ca o combinație de ecuații exponențiale [37]

$$\Delta \theta(t) = \Delta \theta_{o,max} \left[ 1 - \beta_1 e^{-\frac{t-\tau_{mc}}{T_1}} - \beta_2 e^{-\frac{t-\tau_{mc}}{T_2}} \right] \quad (3.76)$$

unde:  $\beta_1 = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$  ,  $\beta_2 = \frac{T_2}{T_2 - T_1}$  , și condiția  $\beta_1 + \beta_2 = 1$  (3.77)

Ecuția se rezolvă pentru 10 valori ale temperaturii  $\theta(t)$  la intervale de timp  $\Delta t$  egale (= 1 min), atunci când  $\theta(t) < \theta_c$

Procedura de calcul este prin *regula celor mai mici pătrate*.

Se determină  $T_1$  și  $T_2$  [min] ,  $\beta_1$  și  $\beta_2$ .

Pasul 19 Se determină factorul de amortizare :

$$\xi = \frac{T_1 + T_2}{120 \sqrt{T_1 T_2}} \quad [1/\text{sec}] \quad (3.78)$$

Dacă:  $\xi > 1$  - procesul este *superamortizat*;

$\xi = 0$  - procesul este *amortizat oscilant*;

$\xi < 1$  - procesul este *neamortizat*.

Se calculează pulsația naturală [139]:

$$\omega_n = \frac{1}{120 \sqrt{T_1 T_2}} \quad [\text{rad/s}] \quad (3.79)$$

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad [\text{s}] \quad (3.80)$$

Datele rezultate prin rularea subprogramului pot fi salvate în fișierul SAV\_CUP.

### III.4 FUNCȚIILE ȘI STRUCTURA SUBPROGRAMULUI CALC\_REZ

#### III.4.1 Destinația și funcțiile subprogramului CALC\_REZ

Subprogramul este destinat determinării caracteristicilor electrice și termice ale instalației de încălzire cu rezistoare. Subprogramul permite crearea a trei modele de pereți încălzitori, considerați ca fiind cei mai reprezentativi pentru cuptoarele electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare ce funcționează la temperaturi ridicate și pentru care fluxul termic prin radiație directă trebuie să fie cât mai mare posibil. Se remarcă rezistoarele de tip bară sau țeavă rotundă confecționați în formă de zig-zag sau agrafă, dispuse aparent pe pereții laterali ai cuptorului pe un rând sau pe mai multe rânduri paralele precum și cei din bandă patrată sau dreptunghiulară, confecționate și configurate în mod similar, în formă de spirală, pe suport ceramic de susținere și dispuși în șiruri paralele pe pereții laterali ai cuptorului (Fig.3.3).

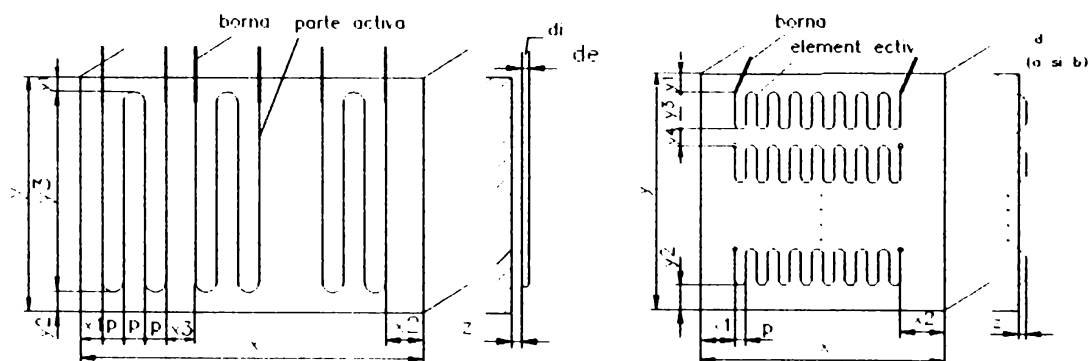


Fig 3.3 Forma și modul de configurare a rezistoarelor

*Funcțiile principale* ale subprogramului sunt următoarele:

a) *Determinarea parametrilor electrici nominali* ai instalației de încălzire: puterea electrică, intensitatea maximă a curentului electric la pornire, intensitatea curentului electric la cald, încărcarea specifică la suprafața rezistorului corectată funcție de modul de configurare a elementului încălzitor în raport cu peretele cuptorului și densitatea fluxului termic disipat de rezistoare raportată la suprafața de perete interior a cuptorului;

b) *Determinarea funcțiilor de variație a temperaturii elementului încălzitor* în raport cu temperatura din interiorul cuptorului și a fluxului termic disipat, după legea lui **Stefan-Boltzmann**, în raport cu diferența între temperaturile elementului încălzitor și cea din cuptor;

c) *Determinarea funcției de transfer termic prin radiație* dată ca produs între suprafața de radiație a elementului încălzitor cu factorul de vedere geometric, a cărui valoare depinde de modul de configurare a rezistorului pe peretele cuptorului, precum și pierderea din radiația termică directă între două elemente active învecinate și către peretele cuptorului;

d) *Determinarea factorului de amplificare maxim* a cuptorului, a benzii de proporționalitate și construcția *funcției indiciale a cuptorului* (curba de creștere în temperatură a cuptorului), aproximată ca o combinație de două funcții exponențiale.

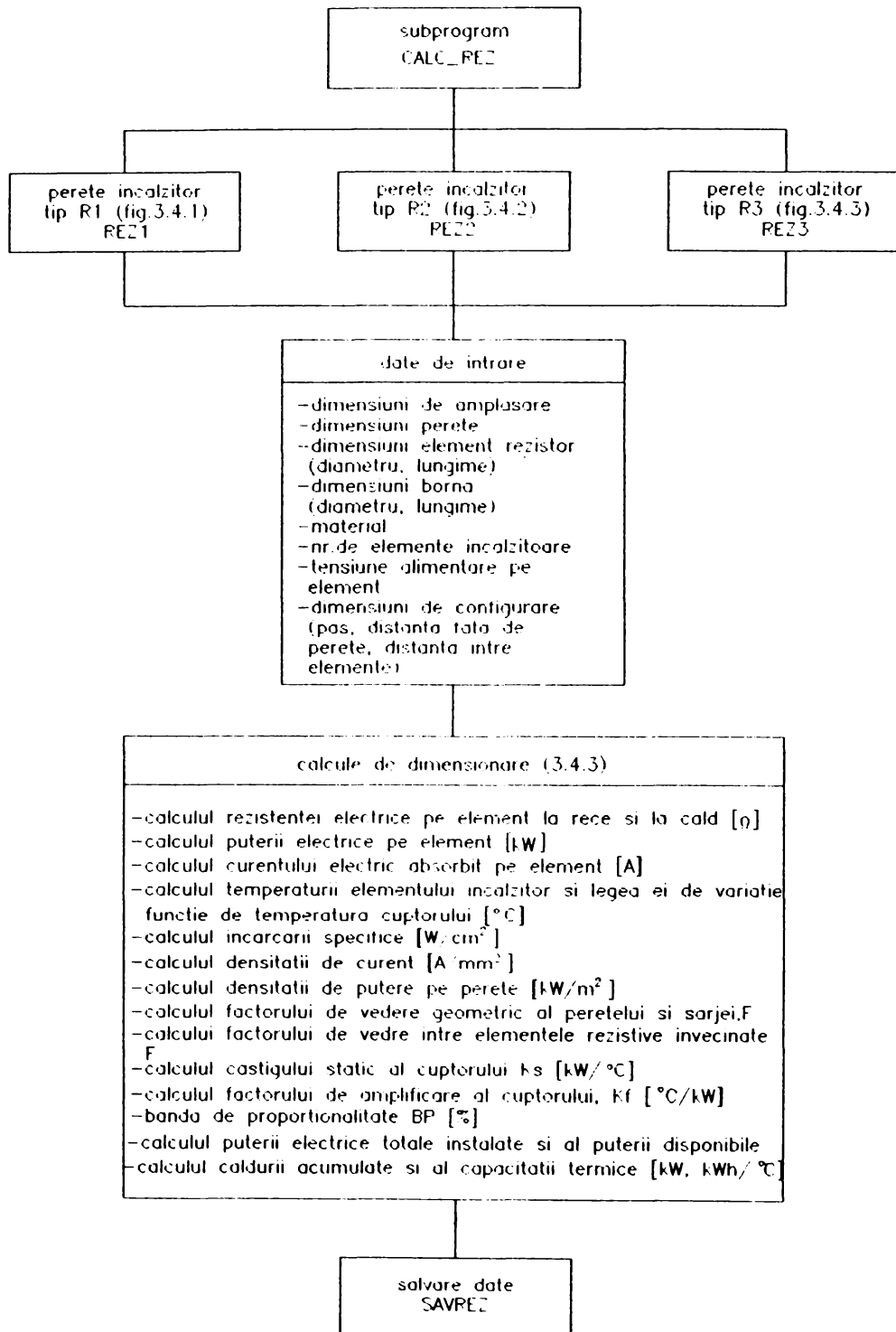
#### III.4.2 Precizări privind algoritmul de programare în **CALC\_REZ**

În algoritm au fost introduse elemente de dimensionare specifice tipurilor de elemente *încălzitoare rezistive din materiale metalice refractare* a căror rezistivitate electrică prezintă o variație lineară cu temperatura.

Nu au fost luate în considerare eventualele neuniformități în repartitia densității de curent în material ca urmare a efectului pelicular provocat de armonicile curentului, generate de echipamentele electronice de comandă cu tăiere de undă, sau ca urmare a modificării structurii materialului prin carburare superficială pe fața aflată în contact direct cu atmosferele carburante din cuptor.

Capacitatea termică a rezistoarelor nu variază în mod semnificativ odată cu variația temperaturii din cuptor [56,123].

### III.4.3 Structura și algoritmul de programare pentru subprogramul CALC\_REZ



Date de intrare

Alegere tip de perete încălzitor (R1,R2,R3)	
Date geometrice de configurare rezistoare pe pereți	
Date dimensionale ale elementului încălzitor:	
- diametre ( $d_e, d_i$ )	[mm]
- lungimea activă, $L_a$	[m]
- diametru bornă, $d_b$	[mm]
- lungime bornă, $L_b$	[m]
Număr de elemente	(2-9)
Material rezistor și bornă	
Tensiunea de alimentare element	[V]

## Faza 1      Calcule inițiale [155,159,160,164]

a) *Secțiunea elementului încălzitor:*

$$S_{el} = \frac{\pi(d_e^2 - d_i^2)}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.81)$$

unde:  $d_e$  - diametrul exterior [mm];  
 $d_i$  - diametrul interior [mm];

b) *Secțiunea bornei:*

$$S_b = \frac{\pi d_b^2}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad (3.82)$$

unde:  $d_b$  - diametrul bornei [mm];

c) *Rezistența electrică pe element:*

$$R_{el} = \rho \left[ \frac{L_a}{S_{el}} + \frac{L_b}{S_b} \right] \quad [\Omega] \quad (3.83)$$

unde:  $L_a$  - lungimea activă a rezistorului [m];  
 $L_b$  - lungime bornă [m];

$$\rho(\theta) = \rho_{20} [1 + (\theta - 20) \varepsilon] \quad [\Omega] \quad (3.84)$$

unde:  $\varepsilon$  - coeficient de variație a rezistenței cu temperatura [1/°C];

**Faza 2** Calculul parametrilor electrici [12]:Pasul 1 Calculul curentului electric prin element:

$$I_{e1} = \frac{U}{R_{e1}(\theta)} \quad [\text{A}] \quad (3.85)$$

Pasul 2 Calculul densității de curent prin material:

$$J = \frac{I_{e1}}{S_{e1}} \left[ \frac{\text{A}}{\text{mm}^2} \right] \quad [\text{A/mm}^2] \quad (3.86)$$

Pasul 3 Calculul puterii:a) *absorbită* de un element:

$$P_{o1} = \frac{U^2}{R_{e1}(\theta)} \quad [\text{W}] \quad (3.87)$$

b) *instalată* pe cuptor pentru încălzire:

$$P_{inst} = n_{e1} P_{o1} \quad [\text{W}] \quad (3.88)$$

unde:  $n_{e1}$  - număr de elemente încălzitoare identicec) *disponibilă* pentru încălzire șarjă la o temperatură dată:

$$P_{di} = P_{inst} - P_0 \left( \frac{\theta_c}{\theta_a} - 1 \right)^A \quad [\text{W}] \quad (3.89)$$

unde coeficienții  $P_0$  și  $A$  sunt extrași din SAV\_CUP.Pasul 4 Încărcări specifice:a) *la suprafața* elementului:

$$p_s = \frac{P_{o1} 10^2}{\pi d_e L_a} \quad [\text{W/cm}^2] \quad (3.90)$$

corectată cu raportul între suprafețele aparentă și reală :

$$p_{sc} = p_s \frac{S_a}{S_r} = p_s \frac{p}{\pi d_e} \quad [\text{W/cm}^2] \quad (3.91)$$

unde:  $S_a$  - suprafața aparentă  $[\text{m}^2]$ ;  
 $S_r$  - suprafața reală  $[\text{m}^2]$ ;  
 $p$  - pasul între două elemente învecinate  $[\text{mm}]$ ;  
 $d_e$  - diametrul exterior al rezistorului  $[\text{mm}]$ .

b) Densitatea fluxului termic disipat pe unitate de suprafață perete cuptor:

$$p_p = \frac{P_{\text{inst}}}{2XY} \quad [\text{W/m}^2] \quad (3.92)$$

unde X, Y sunt dimensiunile peretelui încălzitor [m].

Pasul 5 Legea de variație a temperaturii rezistorului [148,155]

$$\theta_r = \sqrt[4]{\frac{p_c 10^4}{5,67 \epsilon_r F_{R-P}} + (\theta_c + 273)^4} - 273 \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.93)$$

unde:  $F_{R-P}$  - factorul de vedere între rezistor și șarjă (vezi relația 2.44, pag.35);  
 $\epsilon_r$  - emisivitatea rezistorului.

**Faza 3** Calculul capacității termice a rezistorilor

$$C_r = \frac{E_{ar}}{\theta_c - \theta_a} \quad [\text{Wh}/^\circ\text{C}] \quad (3.94)$$

unde:

$$E_{ar} = V_r \gamma_r c(\theta_r) = [S_{a1} \times L_a \times n_{e1} \times 10^{-6} + S_b \times L_b \times 2 \times n_{e1} \times 10^{-6}] \gamma_r c(\theta_r) \quad (3.95)$$

unde:

$$c(\theta_r) = c_0(1 + d \times \theta_r) \quad (3.96)$$

$c(\theta_r)$  - căldura masică variabilă cu temperatura a materialului [Wh/kg $^\circ\text{C}$ ];

$\gamma$  - masa volumică a materialului [kg/m $^3$ ];

$c_0, d$  - coeficienții funcției de variație a căldurii masice.

**Faza 4** Se calculează factorii de vedere geometrici

a) între două elemente învecinate [80](în conformitate cu Fig.2.7, pag.35):

$$F_{R-R} = \frac{1}{\pi} \left[ \arcsin \frac{d_o'}{p} + \sqrt{\left(\frac{p}{d_o'}\right)^2 - 1} - \frac{p}{d_e} \right] \quad (3.97)$$

b) Între elementul încălzitor și perete cu relația 2.44 de la pag.35 [64,80].

Pasul 6 Se calculează factorul de amplificare al cuptorului și a benzii de proporționalitate

$$K_{r0} = \frac{1}{4 \sigma \epsilon_r \theta_r} \quad [^{\circ}\text{C}/\text{kW}] \quad (3.98)$$

$$\text{BP} = \frac{100}{k_f} \quad [\%] \quad (3.99)$$

Pasul 7 Funcția indicială de variație a temperaturii cuptorului în timp în reglaj continuu [44]

$$\Delta \theta(t) = \frac{1}{K_e} \left[ \Delta \epsilon + \frac{1}{T_i} \int_0^t \Delta \epsilon_i dt + T_d \frac{d(\Delta \epsilon_i)}{dt} \right] \quad (3.100)$$

unde:

$$\Delta \epsilon_i(t) = \theta_{\text{cons}}^t - \theta_{\text{mas}}^t \quad [^{\circ}\text{C}] \quad - \text{eroarea temperaturii măsurate față de temperatura de consemn} \quad (3.101)$$

$\theta_{\text{cons}}$  - temperatura de consemn [ $^{\circ}\text{C}$ ];  
 $\theta_{\text{mas}}$  - temperatura măsurată la pasul de timp t [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Datele rezultate prin rularea pot fi salvate în fișierul SAV\_REZ.

### III.5 FUNCȚIILE ȘI STRUCTURA SUBPROGRAMULUI MOD\_ȘARJ

#### III.5.1 Destinația și funcțiile subprogramului MOD\_ȘARJ

Subprogramul este destinat realizării unor modele termice de șarjă, pentru tipurile de șarje constituite din repere tehnologice divizate, omogene și av aceiași formă geometrică, distribuite dezordonat în coșuri (vrac) sau ordonat pe suportți și configurați opțional.

Funcțiile principale ale subprogramului sunt:

a) Generarea modelului termic de șarja brută (repere+dispozitive+suportți) pe baza unor criterii de similitudine care se vor preciza în paragraful următor și funcție de modul de configurare a șarjei reale în camera cuptorului;

b) Verificarea condiției de menținere a piesei model în aceeași categorie de piesă termic subțire, ca și piesa reală, prin determinarea coeficientului criterial Biot [116,117,119,149].

#### III.5.2 Precizări privind algoritmul de programare în MOD\_ȘARJ

Tipul de șarjă supus modelării constituie marea majoritate a șarjelor reale întâlnite în producția industrială. Cele mai frecvente șarje sunt constituite din piese divizate care prezintă caracteristica de piese termic subțiri.

Șarja netă constituită din reperele de tratat, reprezintă cel mult 50% din șarja brută, restul reprezent așa numita șarjă balast, formată din suportții și dispozitivele necesare a caza reperele tehnologice și de a asigura transportul și manipularea șarjei.

Când se tratează procesul de încălzire aL unei șarje trebuie ținut cont de



întreaga masă a șarjei brute, fapt pentru care în algoritmul de modelare a șarjei s-a considerat masa șarjei brute.

Tipul modelului de șarjă, atât pentru șarje constituite din piese mărunte distribuite în vrac, cât și pentru șarje constituite din piese divizate distribuite ordonat, constituie o opțiune pe baza următoarelor argumente :

- *reperele de tip bucsi și role*, de formă geometrică cilindrică cu gol interior, au pereți în general subțiri.

*Rezistențele de contact*, implicate prin distribuția acestor piese în coș, între ele sau cu pereții coșului pot fi neglijate în transferul termic.

*Factorul de umplere* cu material a șarjei nete este sub **30%**, restul reprezentând goluri umplute cu aer sau cu atmosferă gazoasă din cuptor.

*Piesele sunt termic subțiri*, iar transferul termic se realizează preponderent prin radiație, aportul convecției fiind semnificativ doar la suprafața exterioară a șarjei și pentru o durată scurtă în timp, atunci când temperatura la suprafața șarjei este sub  $500-600^{\circ}\text{C}$  [12].

Pentru acest tip de șarjă s-a imaginat un model simplu, în *variante de generare*, după înălțimea șarjei reale, dată de modul de configurare (pe rânduri suprapuse de coșuri amplasate pe suportii de șarjare). Acestea sunt :

- *model din plăci dreptunghiulare paralele*, egal distanțate pentru situația când înălțimea șarjei reale ocupă peste **70%** din înălțimea cuptorului și  
- *model în cuve dreptunghiulare concentrice* în caz contrar. În acest ultim caz se presupune că aportul fluxului termic de la peretele încălzitor spre partea superioară a șarjei nu mai poate fi de neglijat (Fig 3.4).

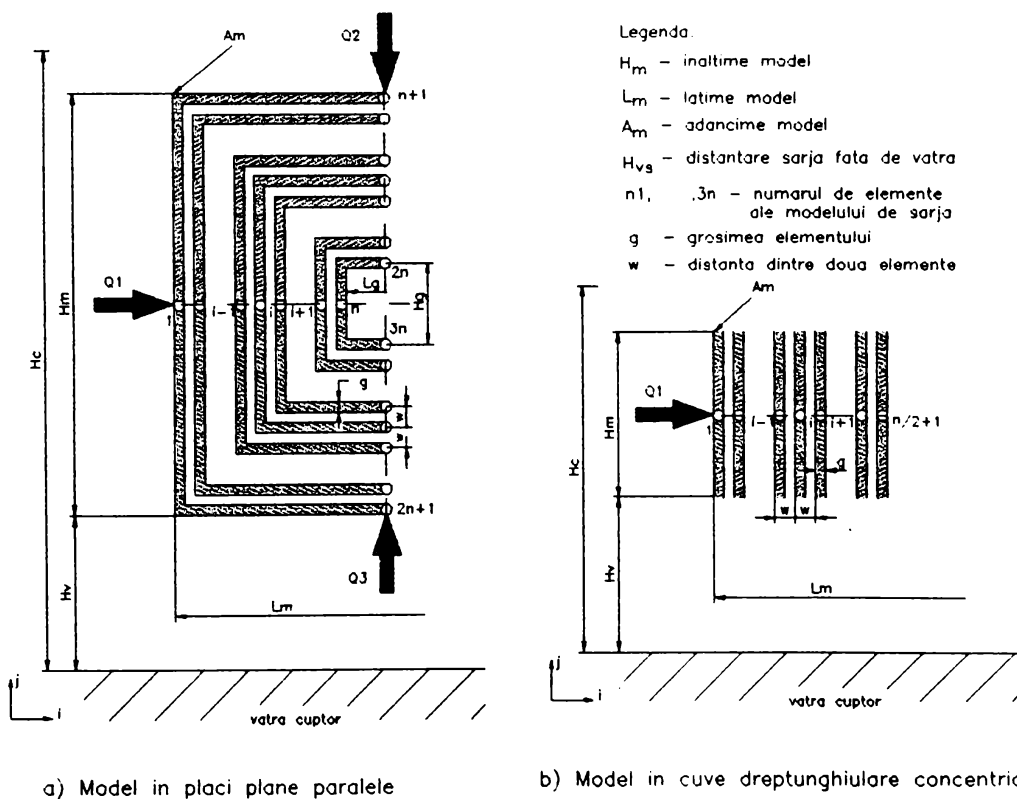


Fig.3.4 Șarja model pentru piese distribuite în vrac

- *reperele de tip arbori* de diametre mici, distribuite ordonat pe suporti, egal distanțați, s-au modelat pe baza unor criterii specifice de similitudine, care să reproducă modul real de distribuție a pieselor pe suporti. Modelul ales constă din *piese prismatice* egal distanțate care să asigure o suprafață de schimb termic prin radiație cu piesele învecinate în proporție de **30%** din suprafața totală (Fig 3.5).

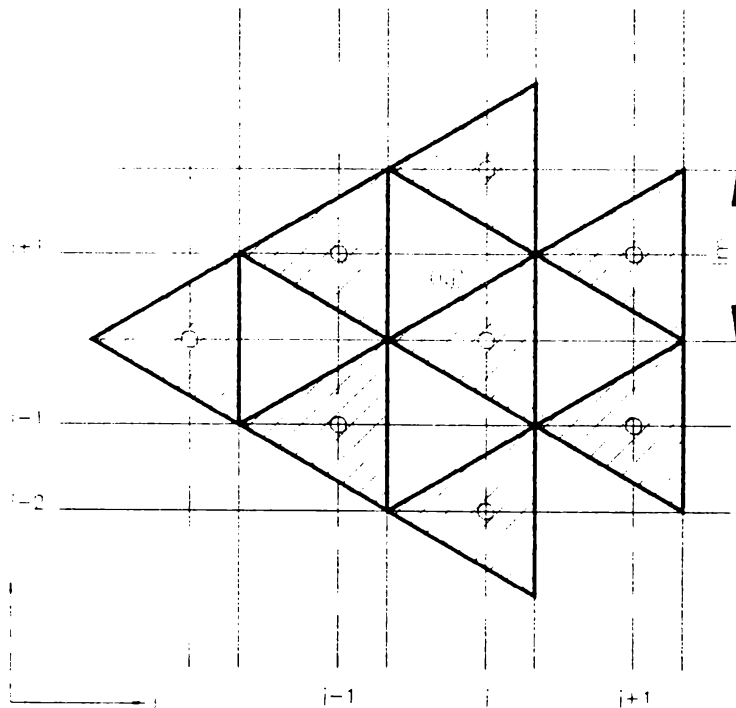
În algoritmul de generare a modelului termic de șarje au fost stabilite următoarele *criterii de similitudine*:

a) *Dimensiunile de gabarit* ale șarjei model trebuie să fie aceleași ca ale șarjei reale brute, pentru a reproduce modul de configurare în spațiul util al cuptorului;

b) *Masa șarjei* model trebuie să fie identică cu masa șarjei brute pentru a menține capacitatea termică sau inerția termică a șarjei reale;

c) *Suprafața de schimb termic* a șarjei model trebuie să fie aceeași cu suprafața de schimb termic a șarjei brute reale, atât din considerente termice la schimbul termic prin radiație și convecție, cât și din considerente de transfer de masă în procesele de carburare;

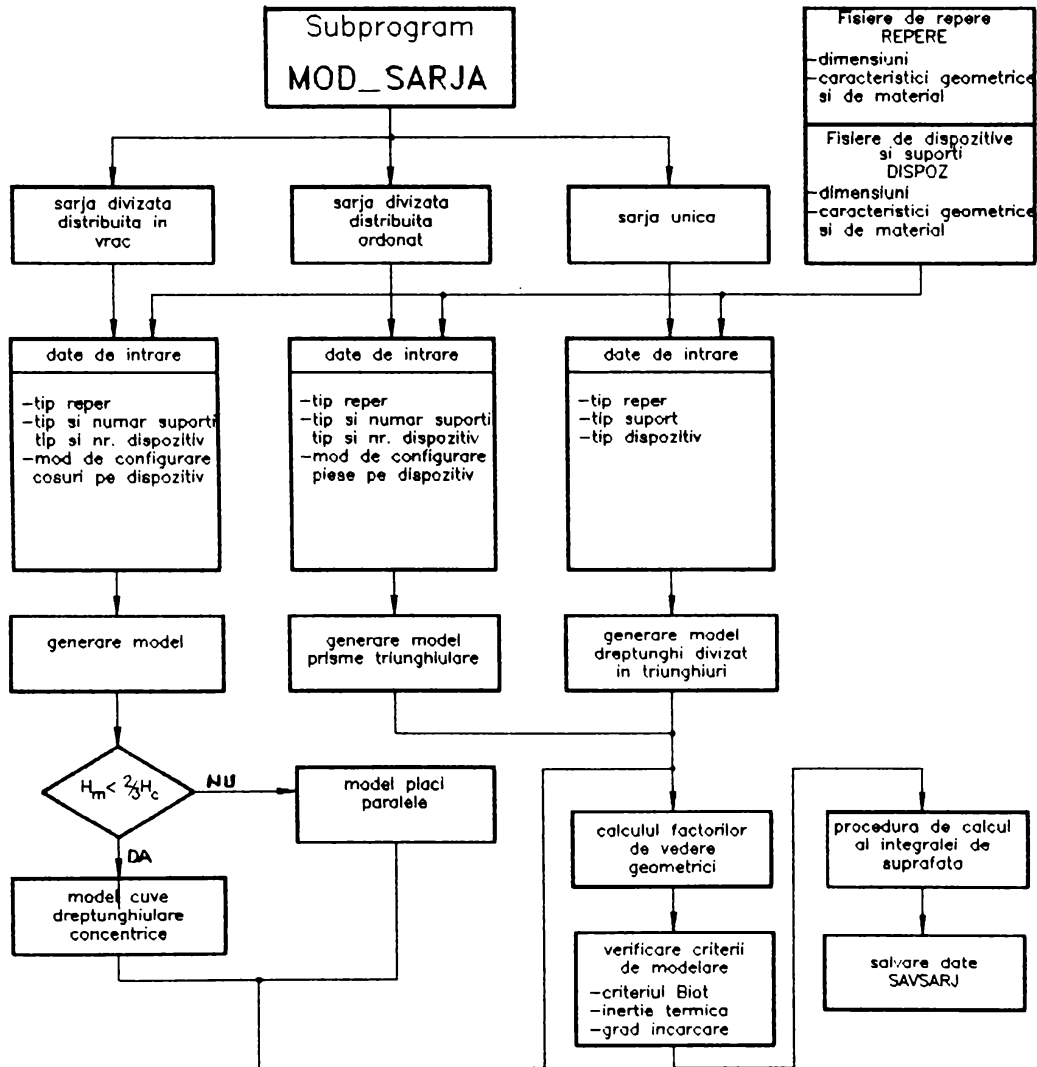
d) *Caracterul de piesă termic subțire* a piesei tehnologice se conservă prin piesa model.



unde  $l_0$  - latura triunghiului echilateral de bază a prisme.

Fig.3.5 Șarjă model prisme triunghiulare spațiale regulate

III.5.3 Structura și algoritmul de programare pentru subprogramul MOD\_SARJA



## Date de intrare

Alegere tip de dispozitiv și suport de șarjă (material, dimensiuni geometrice, greutate)	
Date privind modul de configurare:	
- număr suport, $n_s$ ;	(1-2)
- număr de coșuri pe rând, $n_c$ ;	(2-4)
- număr de ruri suprapuse pe suport $n_r$ ;	(1-4)
Dimensiunile spațiului util în cuptor:	
- Lățime, $L_c$	[m];
- Înălțime, $H_c$	[m];
- Adâncime, $A_c$	[m];
Masa netă de piese în coș	[kg], (max. 10 Kg), sau
Masa netă a unei piese	[kg];
Multiplu de incrementare:	(10-100)

**A. Șarjă constituită din piese divizate, identice, distribuite în vrac****Faza 1** Calcule inițiale [45]

## a) Calculul înălțimii șarjei reale (șarjă + dispozitiv)

$$H_s = H_{c.o.s} n_r + H_{sup} \quad [m] \quad (3.102)$$

unde:  $H_{c.o.s}$  - înălțimea coșului [m];  
 $H_{sup}$  - înălțimea suportului [m];  
 $n_r$  - număr de rânduri.

Se acoperă  $H_s$  cu  $H_c$

Dacă  $H_s < 1/3 H_c$ , se generează model în cuve concentrice dreptunghiulare;

Dacă  $H_s \geq 2/3 H_c$  se generează model în plăci paralele;

Se impune criteriul de similitudine între șarja brută și șarja model, ținând cont ca:

$$\begin{aligned} V_{sb} &= V_{sm} \\ H_{sb} &= H_{sm} \text{ (înălțimi)} \\ L_{sb} &= L_{sm} \text{ (lățimi)} \\ A_{sb} &= A_{sm} \text{ (adâncimi)} \end{aligned}$$

## b) Calculul suprafeței totale de schimb termic al șarjei brute

$$S_{t,b} = n_s S_s + n_c \times n_s \times n_r \times S_c + n_s \times n_c \times n_r \times \frac{G_n}{G_p} \times S_p \quad [m^2] \quad (3.103)$$

unde:  $S_s$  - suprafața suportului [m<sup>2</sup>];  
 $S_c$  - suprafața coșului [m<sup>2</sup>];  
 $G_n$  - greutatea netă a șarjei în coș [kg];  
 $G_p$  - greutatea unei piese [kg];  
 $S_p$  - suprafața unei piese [m<sup>2</sup>];

## c) Greutatea șarjei brute

$$G_{s,b} = n_s G_s + n_s \times n_c \times n_r \times G_c + \frac{G_n}{G_p} \quad [kg] \quad (3.104)$$

unde:  $G_s$  - greutatea suportului [kg];  
 $G_c$  - greutatea unui coș [kg];

d) *Dimensiuni de manevră*

Se aplică criteriul de similitudine

*Greutate șarjă model = Greutate șarjă brută reală*

Greutate șarjă model

$$G_{sm} = A_m \gamma [L_m + H_m - (L_m - 2X)(H_m - 2X)] = 2XA_m \gamma (L_m + H_m - 2X) \quad (3.105)$$

Se determină mărimea:

$$X = \dots$$

unde X - reprezintă o grosime echivalentă a unei cuve dreptunghiulare concentrate

Model cuve concentrice

$$G_{sb} = G_m$$

$$X = \frac{(L_m + H_m) - \sqrt{(L_m + H_m)^2 - 4 \frac{G_{sb}}{\gamma A_m}}}{4} \quad (3.106)$$

Greutate șarjă model

$$G_{sm} = XH_m A_m \gamma \quad (3.107)$$

Se determină mărimea:

$$X = \dots$$

unde X - reprezintă grosimea echivalentă a unei plăci concentrate

Model plăci paralele

$$G_{sb} = G_m$$

$$X = \frac{G_{sb}}{A_m \times H_m \times \gamma} \quad (3.108)$$

unde:  $L_m$  - lățimea modelului (=  $L_c$ );  
 $H_m$  - înălțimea modelului (=  $H_c$ );  
 $A_m$  - adâncimea modelului (=  $A_c$ );  
 $\gamma_m$  - masa volumică a materialului șarjei (piesei) [kg/m<sup>3</sup>];  
 $G_{sb}$  - greutatea șarjei brute [kg];

**Faza 2** Generare model termic [45]

Se aplică criteriul de similitudine

*Suprafață șarjă model = Suprafață șarjă brută reală*

Suprafață șarjă model

$$S_{sm} = 4A_m [(L_m + H_m)n_c - gn_c - wn_c(n_c - 1)] + 2X(L_m + H_m - 2X) \quad (3.109)$$

unde:

$n_c$  - numărul de cuve concentrice  
 $g$  - grosimea peretelui unei cuve [mm]  
 $w$  - distanța între două cuve [mm]  
 $X$  - grosimea totală echivalentă [mm]

Suprafață șarjă model

$$S_{sm} = 4H_m A_m n_p + 2(H_m + A_m)X \quad (3.118)$$

unde:

$n_p$  - numărul de plăci  
 $X$  - reprezintă grosimea totală echivalentă [mm]

Model în cuve concentrice

a) Numărul de cuve:

$$S_{sb} = S_p \quad (3.110)$$

$$n_c = \frac{\frac{S_{sb}}{8A_m} - \frac{3X}{2} - 2L_m H_m + 2(L_m - X)(H_m - X)}{L_m + H_m - 2X} \quad (3.111)$$

n' - număr întreg, cel mai apropiat de n

b) Grosimea cuvei:

$$g = \frac{X}{2n'} 10^{-3} \text{ [mm]} \quad (3.112)$$

c) Distanța între cuve:

$$w = 3g \text{ [mm]} \quad (3.113)$$

Se verifică

$$H_m > 2[n'g + (n' - 1)w] 10^{-3} \quad (3.114)$$

dacă nu este adevărat, atunci:

$$w = 2g \text{ [mm]} \quad (3.115)$$

și se recalculază numărul de cuve:

$$n = \frac{\frac{S_{sb}}{8A_m} - X - 2[A_m L_m] + 2(L_m - X)(H_m - X)}{L_m + H_m - \frac{3X}{2}} \quad (3.116)$$

n' - număr întreg, cel mai apropiat de n

d) Dimensiunile spațiului gol interior:

$$\begin{aligned} L_g &= L_m - 2[n'g + (n' - 1)w] 10^{-3} \text{ [mm]} \\ H_g &= H_m - 2[n'g + (n' - 1)w] 10^{-3} \text{ [mm]} \end{aligned} \quad (3.117)$$

Model în plăci paralele

a) Numărul de plăci:

$$S_{sb} = S_p$$

$$n_p = \frac{S_{sb} - 2(A_m + H_m)X}{2A_m H_m} \quad (3.119)$$

n' - număr întreg impar, cel mai apropiat de n

b) Grosimea plăcii:

$$g = \frac{X}{n'} 10^{-3} \text{ [mm]} \quad (3.120)$$

c) Distanța între plăci:

$$w = \frac{L_m - X}{n' - 1} 10^{-3} \text{ [m]} \quad (3.120)$$

**Faza 3**Verificarea criteriului de similitudine după caracterul de piesă termic subțiri ( $Bi \leq 0,2$ )

a) Calcule inițiale

Model cuve concentrice

$$v/s = \frac{A_m [H_m + L_m] g}{(H_m + L_m) A_m + (H_m + L_m) 3g} \quad (3.121)$$

Model plăci paralele

$$v/s = \frac{A_m H_m g}{2[A_m H_m + (H_m + A_m) g]} \quad (3.122)$$

coeficienți de schimb termic:

$$\alpha_c = \left[ 2,3 + 195 \sqrt{\frac{v_g}{\theta_c + 273}} \right] \text{ [W/m}^2 \cdot \text{C]} \quad (3.123)$$

$$\alpha_r = \frac{4 \cdot \sigma \cdot (\theta_c + 273)^4}{\frac{1}{\epsilon_s} + \left(\frac{1}{\epsilon_r} - 1\right) \frac{H_c A_c}{H_m A_m}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (3.124)$$

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_r \quad (3.125)$$

$$\lambda(\theta) = \left[ 46,4 + 1,74 \frac{\theta_c}{100} \right] \quad [\text{W/m}^\circ\text{C}] \quad (3.126)$$

b) *Calculul criteriului Biot* [149]

Se utilizează relația 2.111 de la pag.32.

Dacă  $B_{i_n} < 0,2$ , șarja model este termic subțire

Se repetă calculul pentru raportul V/S specific reperului .

Dacă  $B_{i_p} \leq 0,2$  și  $B_{i_n} \leq 0,2$ , modelul termic este bine ales.

Dacă  $B_{i_p}$  și  $B_{i_n} > 0,2$ , atunci piesa este termic groasă.

**Faza 4**      **Calculul gradului de încărcare al cuptorului** [45]

Se calculează *inerția termică* a șarjei:

$$I_{th_s} = \frac{E_{as}}{\theta_c - \theta_s} \quad (3.127)$$

Se compară:  $I_{th_s}$  cu  $I_{th_{cuptor}}$

Dacă  $I_{th_s} > I_{th_{cuptor}}$ , *cuptorul este supraîncărcat*;

Dacă  $I_{th_s} < I_{th_{cuptor}}$ , *cuptorul este subîncărcat*.

**Faza 5**      Datele rezultate prin rularea subprogramului pot fi salvate în fișierul SAV\_ȘARJ.

**B. Șarjă constituită din piese divizate, identice, distribuite ordonat**

**Faza 1**      **Calculul inițiale** [45]

a) *Greutatea șarjei brute*:

$$G_{sb} = n_p \cdot G_p + n_s \cdot G_s + n_g \cdot G_g \quad [\text{kg}] \quad (3.128)$$

unde  $n_p$       - numărul de piese;  
 $G_p$       - greutatea unei piese [kg];  
 $n_s$       - numărul de suportți;  
 $G_s$       - greutatea unui suport [kg];

- $n_f$  - numărul de dispozitive (grilaje de distanțare);  
 $G_f$  - greutatea unui dispozitiv [kg].

b) Greutatea piesei model:

$$G_{pm} = \frac{G_{sb}}{n_p} \quad [\text{kg}] \quad (3.129)$$

c) Diametrul echivalent a piesei model (mărime de manevră):

$$D_m = \sqrt{\frac{G_{sb}}{\pi \gamma H_p}} \quad [\text{mm}] \quad (3.130)$$

- unde:  $\gamma$  - masa volumică a materialului [kg/mm<sup>3</sup>];  
 $H_p$  - înălțimea piesei [mm].

Faza 2      Generare model termic [45]

a) Calculul laturii piesei model (prismă triunghiulară regulată)

$$l_m = \frac{\pi D_m}{3} \quad [\text{mm}] \quad (3.131)$$

b) Calculul înălțimii piesei model

$$H_m = \frac{1}{3 l_m} \left( \frac{S_{sb}}{n_p} - l_m^2 \sqrt{3} \right) \quad (3.132)$$

Fazele 3,4,5      - identice punctului **A**, cu specificarea că:

$$v/s = \frac{\sqrt{3} l_m H_m}{4 \left[ 3 H_m + \frac{\sqrt{3}}{2} l_m \right]} \quad (3.5.36)$$

Datele rezultate prin rularea subprogramului pot fi salvate în fișierul SAV\_ȘARJ.

### III.6 FUNCȚIILE ȘI STRUCTURA SUBPROGRAMULUI CALC\_FV.

#### III.6.1 Destinația și funcțiile subprogramului CALC\_FV

Subprogramul este destinat determinării factorilor de vedere geometrice între diferite suprafețe din incinta cuptorului cu șarjă, utilizînd proceduri de identificare a suprafețelor ce "se văd" în mod direct, stabilirii dimensiunilor ariilor suprafețelor care se văd două câte două, stabilirii coordonatelor punctelor de intersecție a laturilor adiacente care formează contururi poligonale și apoi aplicare a unei proceduri de calcul a integralelor duble de contur. Aceasta



utilizează o aproximare a integralelor duble ca sume duble, prin mai multe repetări ale *regulii trapezului* și apoi utilizând tehnica de extrapolare, cunoscută ca metoda *Romberg*, în vederea îmbunătățirii preciziei de calcul (Fig.3.6).

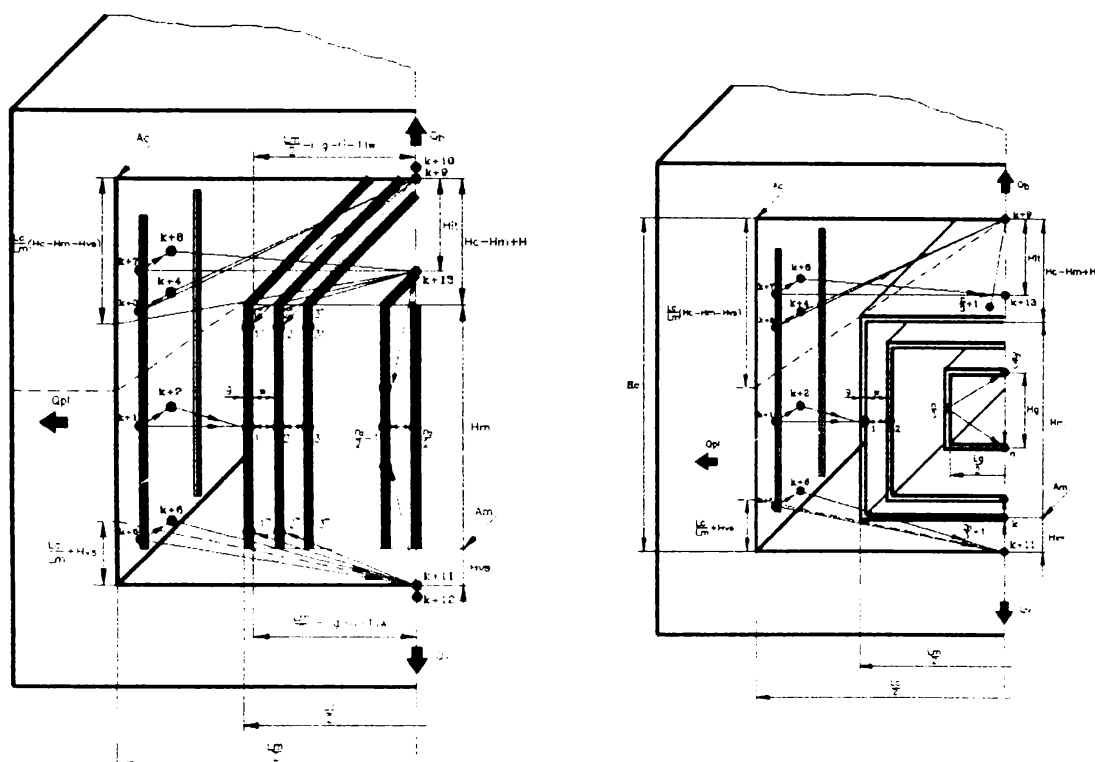


Fig.3.6 Configurarea unui cuptor cameră cu șarjă

Funcțiile principale ale subprogramului sunt:

a) Întocmirea matricii ariilor suprafețelor implicate direct în schimbul termic prin radiație;

b) Determinarea, pas cu pas, a valorilor factorilor de vedere geometrici între perechile de suprafețe care se văd în mod direct, prin apelarea procedurii de calcul integral, iar apoi a celorlanți factori de vedere ce pot fi determinați prin *criterii de reciprocitate* din cei determinați anterior, pentru completarea matricii patrică a factorilor de vedere;

c) Verificarea *criteriului de conservare a energiei termice* în fiecare nod termic, iar acolo unde nu este îndeplinit se procedează la corecția ponderată a fiecărui factor de vedere în raport cu mărimea erorii, sau distribuția diferenței în diagonala matricii, unde în mod obișnuit termenii sunt nuli (suprafețele se văd rareori ele cu inele în mod direct)[3].

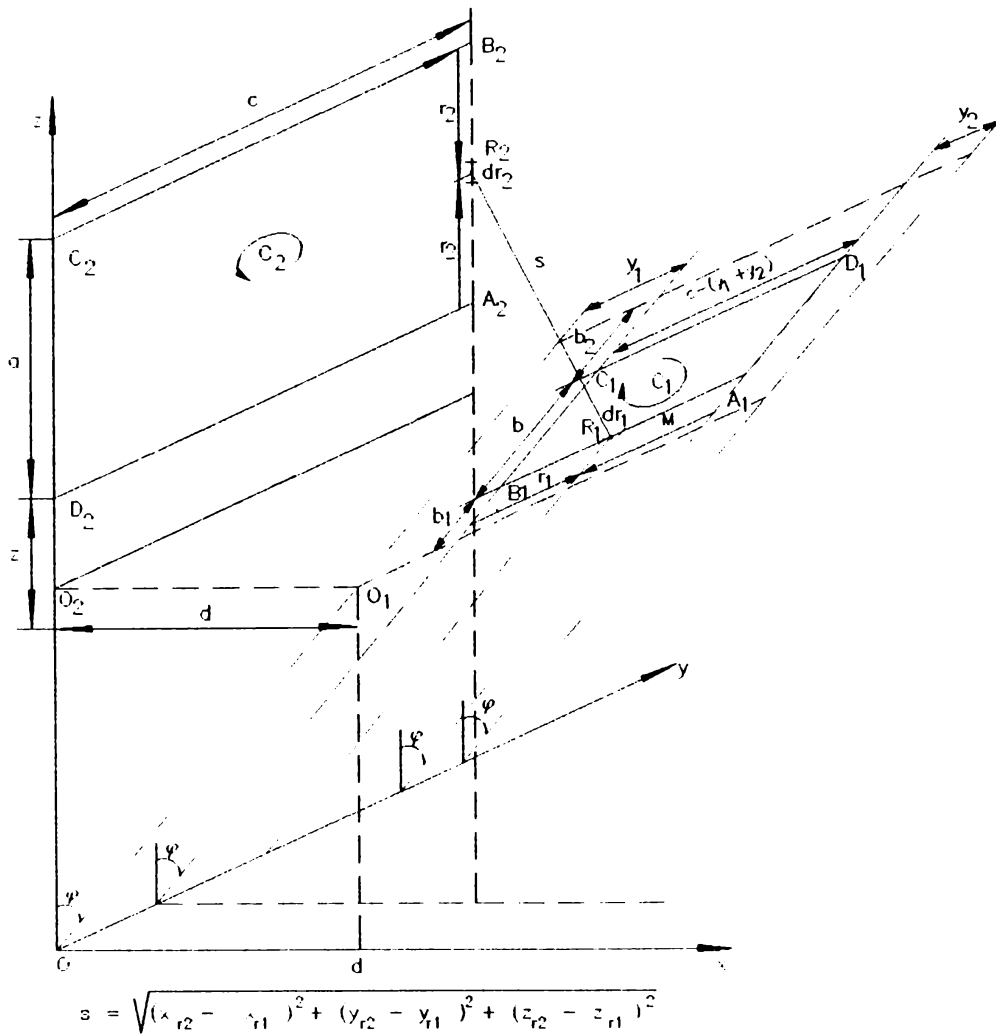


Fig.3.7 Metodologia de determinare a funcțiilor de integrat

### III.6.2 Precizări privind algoritmul de programare în CALC\_FV.

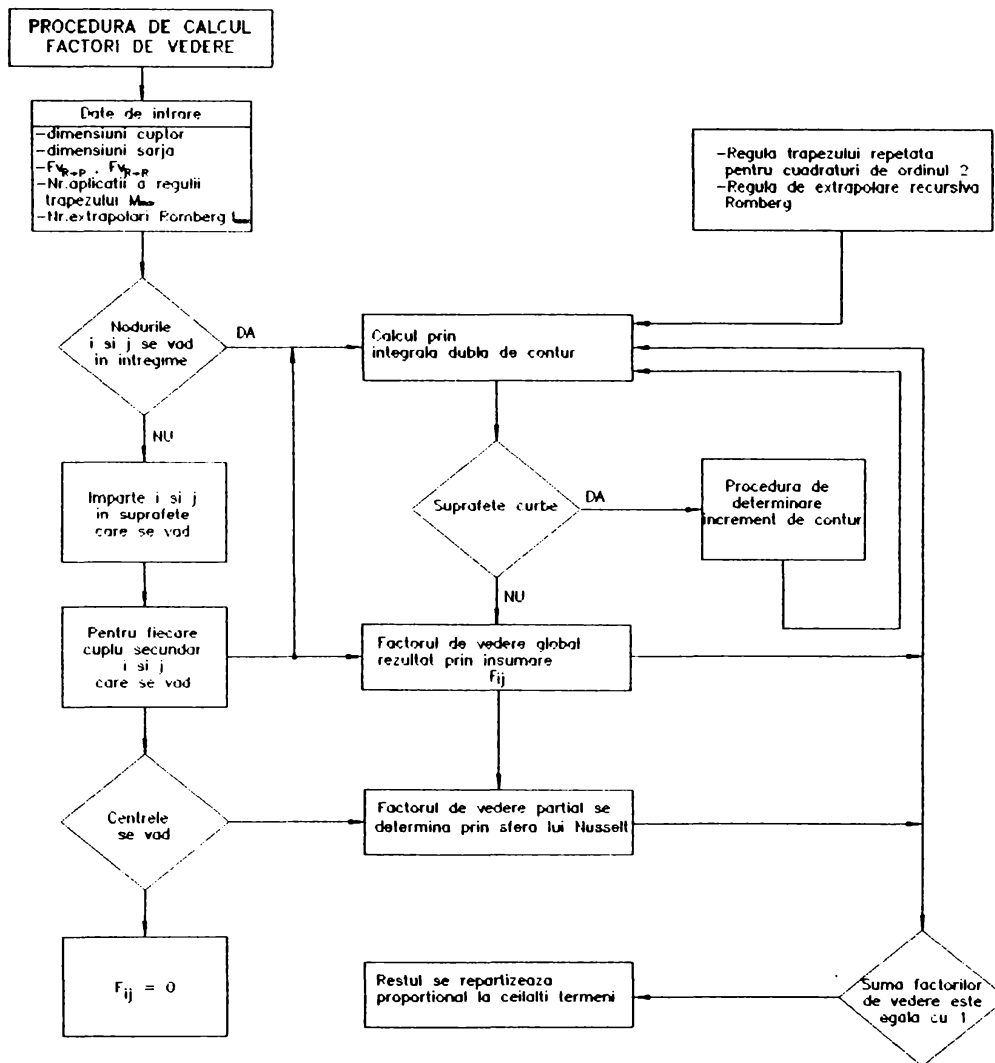
Din cauza disponibilităților de memorie, subprogramul destinat calculului factorilor de vedere a fost limitat la varianta cuptoarelor de tip cameră cu formă paralelipedică, însă poate fi ușor prelucrat în variante de operare și pentru tipuri de suprafețe curbe din cuptor și din șarjă.

S-a constatat că nu sunt necesare mai mult de 6 aplicări repetate ale regulii trapezului și implicit al extrapolărilor Romberg, pentru a obține o convergență corespunzătoare.

În determinarea factorilor de vedere între rezistoare și șarjă s-a ținut cont și de aportul radiației reflectate de perete prin ferestrele create de geometria rezistorului.

În Tab.3.1 și Tab.3.2 sunt date elementele de calcul a parametrilor dimensionali utilizați în program conform Fig.3.7.

III.6.3 Structura și algoritmul de programare pentru subprogramul CALC\_FV



Tabel 3.5.1

$F_{i,j}$		DATE CALCULATE ÎN PROGRAM											
$AP_i IV - pag. j$	$52$	$d$	$a$	$b$	$c$	$b_1$	$b_2$	$c_1$	$c_2$	$z$	$s_1$	$s_2$	
$i+1$ $i=1 \dots \frac{n}{3}$	$i$ $i=1 \dots \frac{n}{3}$	0	w	$H_m - 2(i-1) \cdot (g+w)$	$H_m - 2i(g+w)$	$A_m$	$(g+w)$	0	0	0	0	$A_m [H_m - 2i(g+w)]$	$A_m [H_m - 2(i-1)(g+w)]$
$i+1$ $i=\frac{n}{3} + 1 \dots \frac{2n}{3}$	$i$ $i=\frac{n}{3} + 1 \dots \frac{2n}{3}$	0	w	$\frac{L_m}{2} - (i-1) \cdot (g+w)$	$\frac{L_m}{2} - i(g+w)$	$A_m$	$(g+w)$	0	0	0	0	$A_m \left[ \frac{L_m}{2} - i(g+w) \right]$	$A_m \left[ \frac{L_m}{2} - (i-1)(g+w) \right]$
$i+1$ $i=\frac{2n}{3} + 1 \dots n$	$i$ $i=\frac{2n}{3} + 1 \dots n$	0	w	$\frac{L_m}{2} - (i-1) \cdot (g+w)$	$\frac{L_m}{2} - i(g+w)$	$A_m$	$(g+w)$	0	0	0	0	$A_m \left[ \frac{L_m}{2} - i(g+w) \right]$	$A_m \left[ \frac{L_m}{2} - (i-1)(g+w) \right]$
$\frac{n}{3}$	$\frac{2n}{3}$	90	0	$\frac{L_f}{2}$	$H_f$	$A_m$	0	0	0	0	0	$H_f \times A_m$	$\frac{L_f \times A_m}{2}$
$\frac{n}{3}$	n	90	0	$\frac{L_f}{2}$	$H_f$	$A_m$	0	0	0	0	0	$H_f \times A_m$	$\frac{L_f \times A_m}{2}$
1	k-2	0	$\frac{L_c - L_m}{2}$	$H_c$	$H_m$	$A_c$	$H_w$	$H_c - H_m - H_w$	$\frac{A_c - A_m}{2}$	$\frac{A_c - A_m}{2}$	0	$H_c \times A_m$	$H_m \times A_m$
$\frac{n}{3} + 1$	k+8	90	0	$H_c - H_m - H_w$	$\frac{L_m}{2}$	$A_c$	$\frac{L_c - L_m}{2}$	0	$\frac{A_c - A_m}{2}$	$\frac{A_c - A_m}{2}$	0	$\frac{L_m \times A_m}{2}$	$\frac{A_c}{2} (H_c - H_m - H_w)$
$\frac{n}{3} + 1$	k+9	0	$H_c - H_m - H_w$	$\frac{L_c}{2}$	$\frac{L_m}{2}$	$A_c$	$\frac{L_c - L_m}{2}$	0	$\frac{A_c - A_m}{2}$	$\frac{A_c - A_m}{2}$	0	$\frac{L_c \times A_c}{2}$	$\frac{L_m \times A_m}{2}$
k+9	k+4	90	0	$\frac{L_c}{L_m} (H_c - H_m - H_w)$	$\frac{L_c}{2}$	$A_c$	0	0	0	0	0	$\frac{L_c \times A_c}{2}$	$\frac{L_m \times A_m}{L_m} (H_c - H_m - H_w)$
$\frac{2n}{3} + 1$	k+6	90	0	$\frac{L_c}{L_m} H_w$	$\frac{L_m}{2}$	$A_m$	$\frac{L_c - L_m}{2}$	0	$\frac{A_c - A_m}{2}$	$\frac{A_c - A_m}{2}$	0	$\frac{L_m \times A_m}{2}$	$\frac{L_c \times A_c}{L_m} \times H_w$
$\frac{2n}{3} + 1$	k+11	0	$H_w$	$\frac{L_c}{2}$	$\frac{L_m}{2}$	$A_m$	$\frac{L_c - L_m}{2}$	0	$\frac{A_c - A_m}{2}$	$\frac{A_c - A_m}{2}$	0	$\frac{L_m \times A_m}{2}$	$\frac{L_c \times A_c}{2}$
k+11	k+6	90	0	$\frac{L_c}{L_m} H_w$	$\frac{L_c}{2}$	$A_c$	0	0	0	0	0	$\frac{L_c \times A_c}{L_m} \times H_w$	$\frac{L_m \times A_m}{L_m} \times H_w$
k+13	$\frac{2n}{3} + 1$	90	0	$\frac{L_m}{2}$	$H_{II}$	$A_m$	$H_c - H_m - H_w - H_u$	0	$\frac{A_m - \pi dt}{2}$	$\frac{A_m - \pi dt}{2}$	0	$H_u \times \frac{\pi dt}{2}$	$\frac{L_m \times A_m}{2}$
k+13	k-8	0	$\frac{L_c}{2}$	$H_c - H_m - H_w$	$H_{II}$	$A_c$	$H_c - H_m - H_w - H_u$	0	$\frac{A_m - \pi dt}{2}$	$\frac{A_m - \pi dt}{2}$	0	$H_u \times \frac{\pi dt}{2}$	$A_c (H_c - H_m - H_w)$
k+13	k+9	90	0	$\frac{L_c}{2}$	$H_{II}$	$A_c$	0	0	$\frac{A_m - \pi dt}{2}$	$\frac{A_m - \pi dt}{2}$	0	$H_u \times \frac{\pi dt}{2}$	$H_u \times \frac{\pi dt}{2}$
$\frac{2n}{3}$	n	0	$H_f$	$\frac{L_f}{2}$	$\frac{L_f}{2}$	$A_m$	0	0	0	0	0	$\frac{L_f \times A_m}{2}$	$\frac{L_f \times A_m}{2}$

Elemente de calcul factori de vedere pentru ansamblul cuplor-sarjii model cuve

Tabel 3.5.2

$F_{i,j}$		DATE CALCULATE ÎN PROGRAM											
$i$	$j$	$\varphi$	$d$	$a$	$b$	$c$	$b_1$	$b_2$	$c_1$	$c_2$	$z$	$s_1$	$s_2$
$i+1$ $i=1 \dots n/2$	$i$ $i=1 \dots \frac{n}{2}$	0	$w$	$H_m$	$H_m$	$A_m$	0	0	0	0	0	$H_m \times A_m$	$H_m \times A_m$
$i$ $i=1 \dots \frac{n}{2}$	$k+10$	90	0	$\frac{L_m}{2} - ig - w(i-1)$	$\frac{w(H_c - H_m - H_{vs})}{\frac{L_m}{2} - ig - w(i-1)}$	$A_c$	$H_c - H_m - H_{vs}$	0	$\frac{A_c - A_m}{2}$	$\frac{A_c - A_m}{2}$	0	$\frac{A_m w (H_c - H_m - H_{vs})}{\frac{L_m}{2} - ig - w(i-1)}$	$A_c \left[ \frac{L_m}{2} - ig - w(i-1) \right]$
$k+13$	$i$ $i=1 \dots \frac{n}{2}$	0	$\frac{L_m}{2} - ig - w(i-1)$	$\frac{w(H_c - H_m - H_{vs} - H_{ii})}{\frac{L_m}{2} - ig - w(i-1)}$	$H_{ii}$	$A_m$	$H_c - H_m - H_{vs} - H_{ii}$	0	$\frac{A_c - \pi d T}{2}$	$\frac{A_c - \pi d T}{2}$	0	$H_{ii} \times \frac{\pi d T}{2}$	$\frac{A_m w (H_c - H_m - H_{vs} - H_{ii})}{\frac{L_m}{2} - ig - w(i-1)}$
$i$ $i=1 \dots \frac{n}{2}$	$k-12$	90	0	$\frac{L_m}{2} - ig - w(i-1)$	$\frac{w H_{vs}}{\frac{L_m}{2} - ig - w(i-1)}$	$A_c$	$H_{vs}$	0	$\frac{A_c - A_m}{2}$	$\frac{A_c - A_m}{2}$	0	$\frac{A_m w H_{vs}}{\frac{L_m}{2} - ig - w(i-1)}$	$A_c \left[ \frac{L_m}{2} - ig - w(i-1) \right]$
1	$k+12$	0	$\frac{L_c - L_m}{2}$	$H_c$	$H_m$	$A_c$	$H_{vs}$	0	$\frac{A_c - A_m}{2}$	$\frac{A_c - A_m}{2}$	0	$H_m \times A_m$	$H_c \times A_c$
$k+9$	$k+4$	90	0	$\frac{L_c}{L_m} (H_c - H_m - H_{vs})$	$\frac{L_c}{2}$	$A_c$	0	0	0	0	0	$\frac{L_c \times A_c}{2}$	$\frac{A_c L_c}{L_m} (H_c - H_m - H_{vs})$
$k+13$	$k+8$	0	$\frac{L_c}{2}$	$H_c - H_m - H_{vs}$	$H_{ii}$	$A_c$	0	0	$\frac{A_c - \pi d T}{2}$	$\frac{A_c - \pi d T}{2}$	0	$H_{ii} \times \frac{\pi d T}{2}$	$A_c (H_c - H_m - H_{vs})$
$k+11$	$k+6$	90	0	$\frac{L_c}{L_m} H_{vs}$	$\frac{L_c}{2}$	$A_c$	0	0	0	0	0	$\frac{L_c \times A_c}{2}$	$\frac{A_c L_c}{L_m} H_{vs}$
$k+13$	$k+9$	90	0	$\frac{L_c}{2}$	$H_{ii}$	$A_c$	0	0	$\frac{A_c - \pi d T}{2}$	$\frac{A_c - \pi d T}{2}$	0	$H_{ii} \times \frac{\pi d T}{2}$	$\frac{A_c L_c}{2}$

Elemente de calcul factori de vedere pentru ansamblul cuplor-sarjii model plăci

Date de intrare

Dimensiuni spațiu util cuptor:	
- Lățime, $L_c$	[m];
- Înălțime, $H_c$	[m];
- Adâncime, $A_c$	[m];
Dimensiuni șarjă:	
- Lățime, $L_s$	[m];
- Înălțime, $H_s$	[m];
- Adâncime, $A_s$	[m];
Înălțimi șarjă față de vatră, $H_{vs}$	[m];
Adâncime de imersie termocuplu, $H_{it}$	[m];
Număr integrări succesive, $N_{max.}$	= ; (max.6)
Număr de extrapolări Romberg $J_{max.}$	= ;
Factor de precizie, $\Delta$	= ; ( $10^{-3}$ - $10^{-6}$ )

Calculare inițiale (funcție de tipul modelului de cuptor și șarjă)

**Pasul 1** Pentru fiecare pereche de suprafețe care se văd una cu cealaltă, se calculează:

a) Elementele date în tabele 3.1 și 3.2 și se întocmește matricea vector a suprafețelor

$$[S_i], \text{ cu dimensiuni } \begin{cases} 3n_p + 14 \text{ elemente pt. model placi paralele} \\ 3n_c + 14 \text{ elemente pt. model cuve concentrice} \\ 3n_{ps} + 14 \text{ elemente pt. model piese ordonate} \end{cases}$$

b) Se calculează dimensiunile matricii pătratice a factorilor de vedere

$$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} & \dots & F_{1n} \\ F_{21} & F_{22} & F_{23} & \dots & F_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_{n1} & F_{n2} & F_{n3} & \dots & F_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.133)$$

în funcție de numărul nodurilor termice din cuptor și șarjă care se văd în mod direct ele între ele.

**Pasul 2** Pentru fiecare pereche de puncte de pe fiecare latură a conturului  $C_1$  și  $C_2$  se calculează setul de 16 funcții reprezentând funcția logaritmică a distanței ( $r$ ) dintre două puncte aflate pe segmente diferite ale celor două contururi

În acest scop se utilizează elementele geometrice și notațiile din Fig.2.7 de la pag.97.

$$\text{FUNC: } f_i = f(r_1, r_2) = \ln [r(r_1, r_2)] \quad (3.134)$$

**Pasul 3** Se întocmește tabloul limitelor de integrare pentru fiecare latură a fiecărui contur în parte

$$[A, B] \text{ și } [C, D]$$

**Faza 2** - Calculul fiecărei integrale dublă de contur[19,45]

**Pasul 4** Se aproximează integrala dublă de contur prin sume duble de cuadratură după regula trapezului pentru  $n=2^k$  repetări:

$$I = h_1 h_2 \left[ \frac{f(A,C) + f(A,D) + f(B,C) + f(B,D)}{4} + \sum_{j=1}^{2^k-1} \frac{f(A,C+jh_2) + f(B,C+jh_2)}{2} + \sum_{\substack{i=1 \\ \Delta i=2}}^{2^k-1} \frac{f(A+ih_1,C) + f(A+ih_1,B)}{2} + \sum_{\substack{i=1 \\ \Delta i=2}}^{2^k-1} \sum_{\substack{j=1 \\ \Delta j=2}}^{2^k-1} f(A+ih_1,C+jh_2) \right] \quad (3.135)$$

unde:  $A, B$  - limitele de integrare după direcția  $r_1$  (pe conturul  $C_1$ );  
 $C, D$  - limitele de integrare după direcția  $r_2$  (pe conturul  $C_2$ );  
 $h_1$  =  $(B-A)/2^k$  - pasul de integrare pe conturul  $C_1$ ;  
 $h_2$  =  $(D-C)/2^k$  - pasul de integrare pe conturul  $C_2$ ;  
 $N$  - numărul pașilor de integrare;

**Pasul 5** Se calculează prima aproximare a integralei duble de contur aplicând repetat regula trapezului pe intervalul  $[A,B]$  și  $[C,D]$  pentru  $n = 2N$  număr de repetări

pentru:  $N = 0$

$$I_{0,1} = \frac{(B-A)(D-C)}{4} [f(A,C) + f(A,D) + f(B,C) + f(B,D)] \quad (3.136)$$

apoi, pentru  $N \geq 1$  până la  $N_{\text{nar}}$ , se utilizează formula de recursivitate:

$$S = (S_1 + S_2 + S_3) \frac{(B-A)(D-C)}{4^{N-1}} \quad (3.137)$$

unde:

$$S_1 = \sum_{j=1}^{2^k-1} \frac{f(A,C+jh_2) + f(B,C+jh_2)}{2}, \text{ respectiv} \quad (3.138)$$

$$S_2 = \sum_{\substack{i=1 \\ \Delta i=2}}^{2^k-1} \frac{f(A+ih_1,C) + f(A+ih_1,B)}{2}, \quad S_3 = \sum_{\substack{i=1 \\ \Delta i=2}}^{2^k-1} \sum_{\substack{j=1 \\ \Delta j=2}}^{2^k-1} f(A+ih_1,C+jh_2)$$

$$\text{și} \quad I_{N,1} = \frac{1}{4} (N_{N-1,1} + S) \quad (3.139)$$

cu criteriul de convergență:

$$\left| \frac{I_{N,1} - I_{N-1,1}}{I_{N-1,1}} \right| \leq \epsilon \quad (3.140)$$

Pasul 6 Se utilizează formula de extrapolare recursivă după metoda Romberg [19,103]

$$\begin{bmatrix} I_{0,1} & I_{0,2} & I_{0,3} & \dots & I_{0,j-1} & I_{0,j_{\max}} \\ I_{1,1} & I_{1,2} & I_{1,3} & \dots & I_{1,j-1} & \\ I_{2,1} & I_{2,2} & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ I_{N-1,1} & I_{N-1,2} & & & & \\ & & & & & \\ I_{N,1} & & & & & \end{bmatrix} \quad (3.141)$$

utilizând formula de recursivitate:

$$I_{N,j} = I_{N+1,j-1} + \frac{I_{N+1,j-1} - I_{N,j-1}}{4^{j-1} - 1} \quad (3.143)$$

Valoarea cea mai corectă a integralei este:  $[I_{0,j_{\max}}]$  (3.143)

Pasul 7 Se calculează factorul de vedere  $F_{i-j}$  între suprafețele "i" și "j":

$$F_{i-j} = \frac{\sum_{k=1}^{16} I_{0,j_{\max}}^k}{2\pi S_i} \quad (3.144)$$

Pasul 8 Se determină ceilalți factori de vedere care nu se calculează direct, ci prin relații de reciprocitate [64,80]

$$F_{i-j} S_i = F_{j-i} S_j \quad (3.145)$$

iar pentru pereții încălzitori echipați cu rezistoare [1,64]

$$F_{R-j} = F_{j-1} F_{R-P} \quad (3.146)$$

Pasul 9 Se verifică pentru fiecare nod condiția [98]

$$\sum_{i=1}^n F_{i,j} = 1 \quad (3.147)$$

Dacă:  $\sum_{i=1}^n = R \neq 1$ , (3.148)

atunci se calculează un factor de pondere care va corecta fiecare termen al sumei proporțional cu mărimea determinată prin calcul de integrare.

Pasul 10 Se salvează în fișierul SAV\_FV valorile din matricile suprafețelor și a factorilor de vedere



### III.7 FUNCȚIILE ȘI STRUCTURA SUBPROGRAMULUI SIMUL\_TERM

Subprogramul de simulare a procesului de încălzire a șarjei în timp se bazează în exclusivitate pe rezultatele obținute din rularea programului prin modulele din amonte, deoarece prin acestea se stabilesc:

- *condițiile de mediu* în care are loc procesul de încălzire a șarjei, caracteristicile termice statice și dinamice ale ansamblului cuptor-instalație de încălzire care participă la proces;

- *densitatea fluxului termic disipat de rezistoare* depinde de temperatura acestora. O parte din căldura degajată este însă consumată prin pierderile cuptorului, care depind la rândul lor de temperatura din cuptor;

- *receptarea fluxului termic emis de rezistoare de către șarjă* depinde de modul de configurare a acestora în spațiul util al cuptorului. De aici și importanța deosebită pe care o prezintă corectitudinea alegerii modelului de șarjă. Acesta trebuie să conserve cât mai mult din elementele caracteristice ale șarjei reale.

*Scopul simulării* este de a determina cu anticipare un regim optim de procesare, obiectiv care poate fi atins numai în măsura în care sunt luați în considerare toți factorii ce participă în mod direct sau indirect la proces și dacă sunt considerate și corectate în timp real toate mărimile care suferă variații cu temperatura sau alți factori de natură internă sau externă cuptorului.

Pe de altă parte, nu poate fi conceput un proces de simulare fără a asigura o *lege de reglare*, pentru fiecare parametru a cărui evoluție trebuie urmărită în timp real. Pentru optimizarea ciclului de procesare se impune implicit și crearea unei funcții de reglare autoacordabilă prin identificare și autoadaptivă, utilizând *algoritmi de identificare și optimizare on-line* a parametrilor funcției de reglare.

Simularea unui proces de tratament termic trebuie să țină cont de modul de derulare a unui proces tehnologic real, precum și de necesitățile de natură tehnologică care se impun.

#### III.7.1 Destinația și funcțiile subprogramului SIMUL\_TERM

Subprogramul este *destinat simulării proceselor de încălzire și răcire* a șarjelor de tip divizat, configurate stabil pe dispozitive specifice tipului de reper tehnologic supus tratamentului termic. Procesele supuse simulării se realizează în cuptoare de tip cameră sau verticale încălzite electric indirect prin rezistoare.

*Funcțiile principale* ale subprogramului sunt:

- a) *Realizarea ciclului de tratament termic* al șarjei, supuse unui proces tehnologic *fără gradient impus* pentru fazele de încălzire sau răcire. Simularea se poate executa în următoarele *variante optionale*:

- *reglarea procesului după temperatura la suprafața șarjei* (ce permite funcționarea cuptorului pe prima fază de încălzire a șarjei cu referință supraindexată, în apropierea *temperaturii maxime de funcționare a elementelor rezistive de încălzire*) sau *reglare după temperatura din cuptor* măsurată prin termocuplu;

- *cu sau fără timp de menținere* la palierul prescris al temperaturii de tratament;

- *cu sau fără subrăcire*, la o temperatură inferioară primei faze de

tratament, în vederea realizării unor condiții tehnologice finale de tratament (de exemplu aducerea șarjei la temperatura de călibilitate 800-830°C).

b) *Controlul prin algoritm de autoacordare și autoadaptare optimă* a dozării puterii electrice, funcție de mărimea semnalului de intrare primit de la termocuplu și funcție de necesarul de putere absorbită de șarje în timp. Această dozare este cuantificată prin comanda regulatorului a căror parametrii funcției de reglare sunt autoacordați dinamic la valorile optime;

c) *Controlul prin condițiile de stop*, specifice combinației regimurilor de simulare, a momentului îndeplinirii condițiilor finale impuse de regimul de tratament și determinarea timpilor scurși de la lansarea procesului de simulare până la finalul acestuia;

c) *Stocarea datelor de interes, în memoria alocată și generarea pe ecran a diagramelor de procesare termică și anume:*

- *diagrama evoluției în timp real a temperaturii la suprafață și în centrul șarjei;*

- *diagrama evoluției în timp real a temperaturii rezistorului;*

- *diagrama evoluției în timp real a temperaturii măsurate de termocuplu, care ține cont de caracteristicile constructive ale termocuplului și de modul de amplasare, în raport cu șarja, pereții cuptorului precum și de temperatura mediului ambiant;*

- *diagrama evoluției în timp real a puterii absorbite de instalație în condițiile unui modulări a puterii prin echipamente statice cu tiristoare ce funcționează cu tren de unde variabil.*

d) *Calculul consumului de energie electrică pe întreaga durată a ciclului de procesare și determinarea consumului specific de energie electrică, raportat la unitatea de masă a șarjei brute.*

### III.7.2 Precizări privind algoritmul de programare în SIMUL TERM

În structura algoritmului de simulare a procesului de tratament termic au fost utilizate mai multe *proceduri și criterii* care să asigure un grad ridicat de precizie a rezultatelor finale.

#### a) referitor la proceduri

- dat fiind specificul de șarjei constituite din piese termic subțiri, este transferul termic prin radiație este preponderent, a fost utilizată o *rețea analogică prin conductanțe radiante și capacități termice* pentru ansamblul cuptor-șarjă, funcție de tipul șarjei model (Fig.3.8;3.9)[45,98,101];

- pentru fiecare increment de timp se realizează rezolvarea sistemului de ecuații liniare al *radiațelor termice*, între toate suprafețele din interiorul cuptorului care participă la schimbul de căldură prin radiație în mod direct sau indirect prin iradiieri (exprimate sub formă explicită, utilizând valorile determinate la pasul de timp anterior). Modul de rezolvare este iterativ prin procedura *Gauss-Seidel*, sub controlul unui criteriu propriu de convergență. Cu noile valori determinate sunt calculate, pe bază de bilanț în fiecare nod termic, *cantitățile reziduale ale fluxului termic* cu care se determină apoi *noile valori ale temperaturilor suprafețelor* corespunzătoare fiecărui nod termic [75,58,117].

- la fiecare pas de timp sunt *determinate constantele de timp*, în nodurile termice unde procesul de acumulare continuă, pentru a *verifica condiția de stabilitate* a soluțiilor; mărimea incrementului de timp ales. Acesta trebuie să fie

mai mică sau egală cu cea mai mică constantă de timp a elementelor capacitive care participă la schimbul termic [56,98,101];

- *parametrii funcției de reglare* sunt determinați pe panta de creștere în temperatura a cuptorului, în apropierea valorii de referință a temperaturii de tratament, după ce temperatura din cuptor a suferit o scădere ca urmare a introducerii șarjei reci. Procedura de identificare a parametrilor funcției de reglare se bazează pe metoda celor mai mici patrate, combinată cu *metoda de alocare a polilor și zerourilor*, impusă de criteriul de stabilitate a reglării [111,112,130,162,163].

#### b) referitor la corecții

- mărimile fizice care suferă variații cu temperatura și cărora li se aplică la fiecare pas de timp corecții, sunt: *puterea emisă prin radiație termică la suprafață, capacitățile termice concentrate în nodurile termice, coeficientul de schimb termic prin convecție, temperatura măsurată în punctul cald al termocuplului, temperatura atmosferei din cuptor, puterea electrică absorbită prin rezistoare, precum și timpilor de conducție și de neconducție al tiristoarelor cu funcționare în tren de undă variabil;*

- acumulările termice din structura de izolație cuptorului, ce suferă variații pe perioada regimului tranzitoriu ca urmare a perturbației provocate de șarja rece, sunt numai cele din primul strat de izolație. Capacitatea termică a rezistoarelor suferă variații ne semnificative datorită timpului foarte scurt de atingere a temperaturii;

- conductanța termică globală a cuptorului este determinată la fiecare pas de timp, funcție de temperatura atmosferei din cuptor. Cu ea se determină pierderile prin suprafața echivalentă de schimb termic a pereților cuptorului.

#### c) referitor la unele criterii adoptate

- factorul de precizie pentru controlul convergenței nu poate fi luat oricât de mic deoarece prin creșterea *erorilor de trunciere și de rotunjire* afectează rezultatele, ca urmare a creșterii numărului de iterații;

- pentru *controlul condiției de stop* s-au utilizat criteriile admise tehnologic prin ecartul permis între temperatura de tratament și valoarea finală a temperaturii în centrul șarjei;

- șarja este partea din ansamblul cuptorului ce trebuie considerată ca fiind într-un regim tranzitoriu cvasipermanent până la atingerea condiției de stop. Pentru a determina condiția de regim staționar al celeilalte părți ale cuptorului, ce participă la proces, se adoptă un *criteriu de calitate* care admite că regimul staționar a fost atins când eroarea patritică a fluxurilor termice care converg într-un nod scade sub 2% [29,95].

- pe durata operației de șarjare-deșarjare, alimentarea cu energie electrică a rezistoarelor este întreruptă din considerente de protecția muncii. Pe durata deschiderii ușii sau capacului cuptorului, în ecuațiile de bilanț termic pentru nodurile de pe suprafețele pereților interiori ai cuptorului și de pe rezistoare, sunt introduse pierderile prin radiația acestora către mediul exterior prin suprafața ușii(capacului).

- răcirea șarjei în cuptor are loc odată cu răcirea cuptorului, pe cale naturală, datorită pierderilor cuptorului. Pentru a asigura o temperatură uniformă la terminarea fazei de răcire s-a introdus un reglaj al temperaturii de răcire după temperatura la suprafața șarjei care se va răci mai repede.

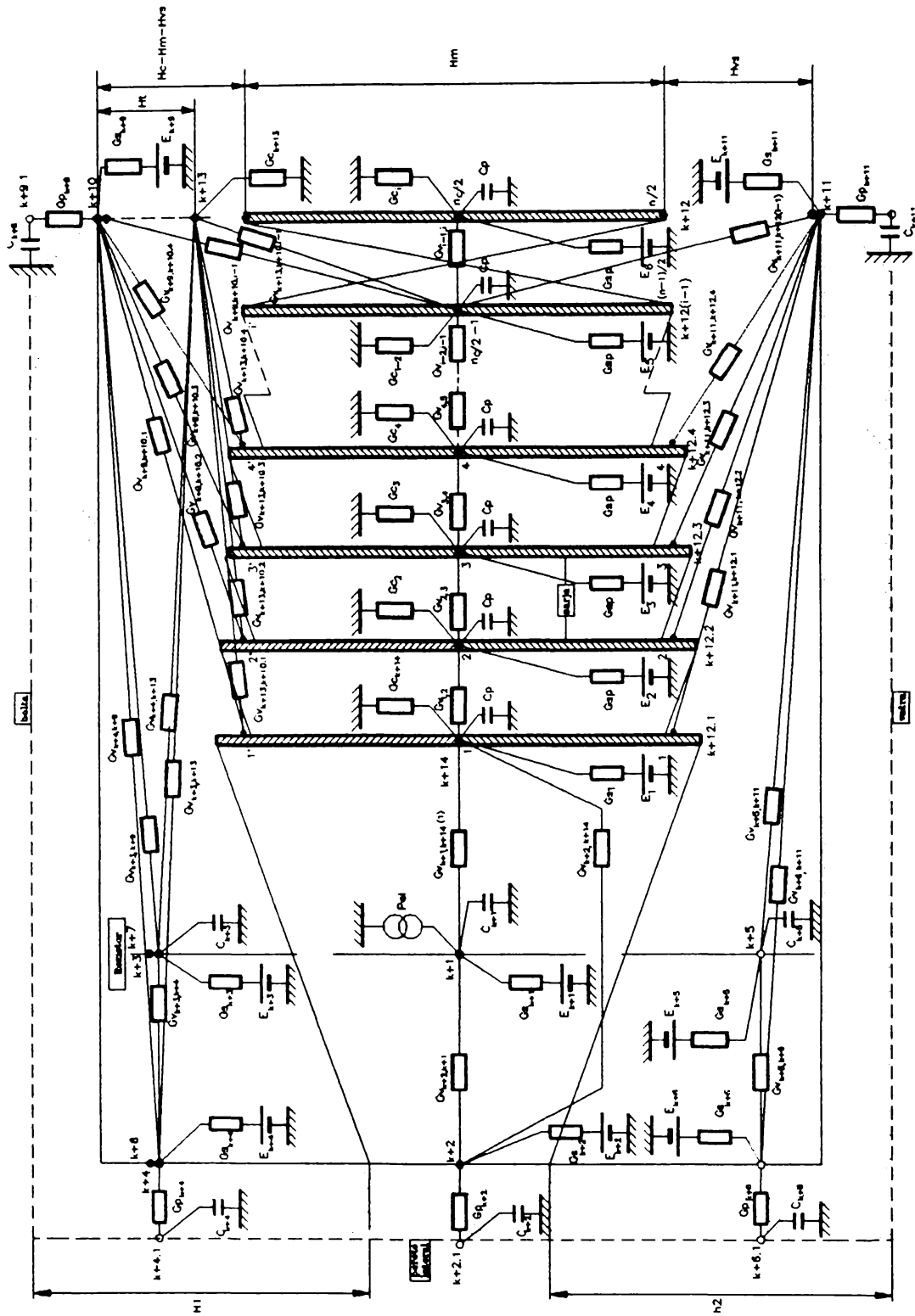


Fig.3.8 Model analogic pentru ansamblu cupor șarjă model plăci

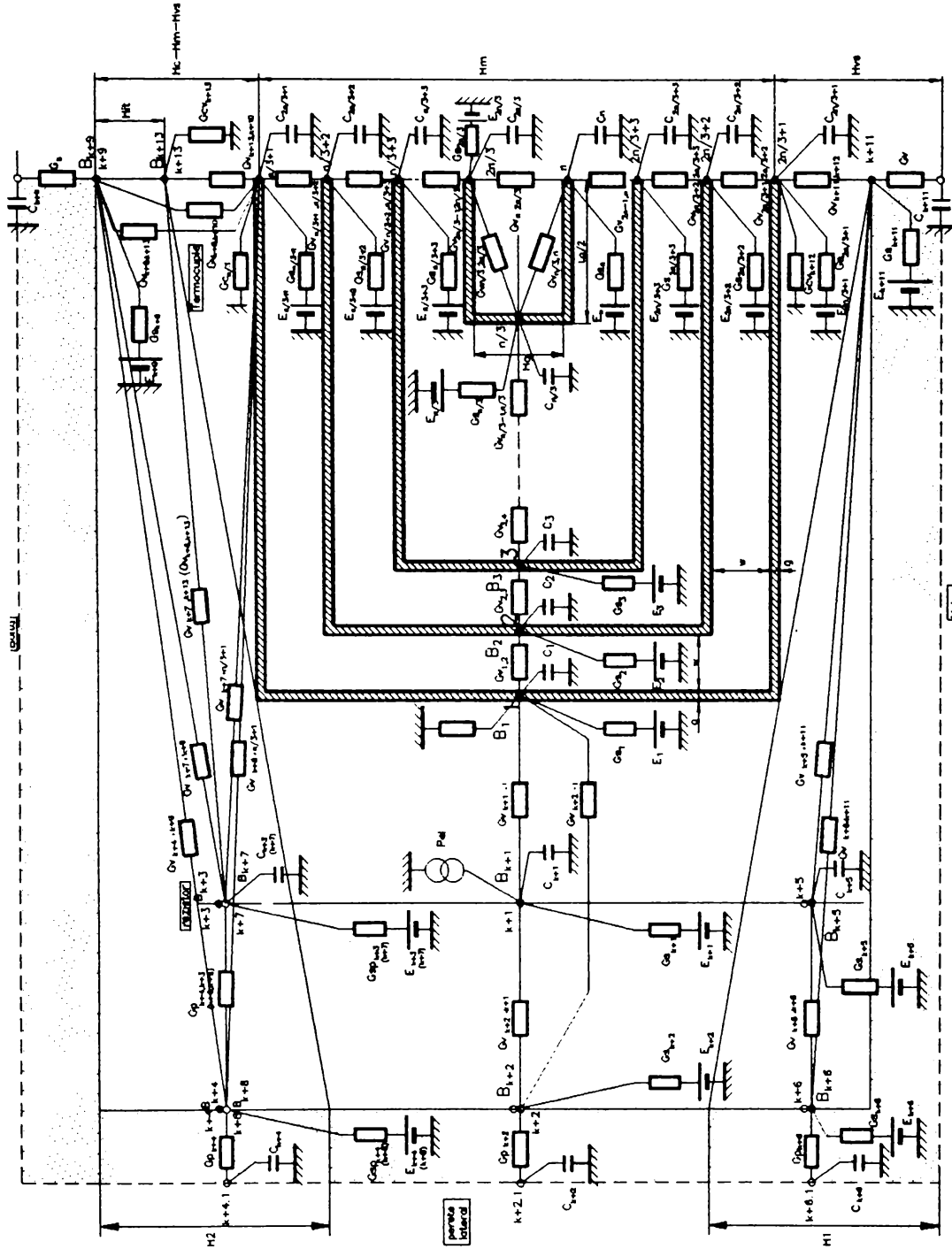
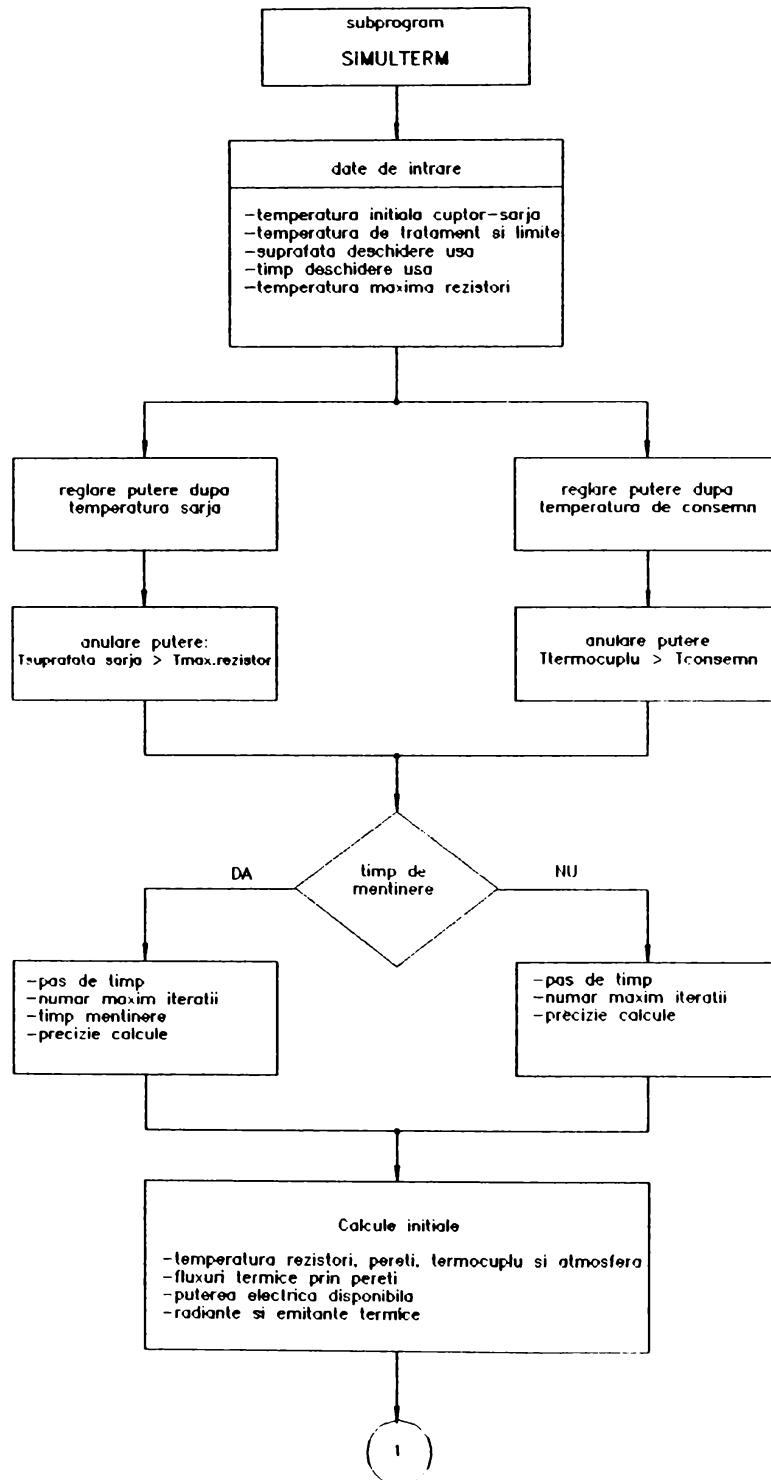
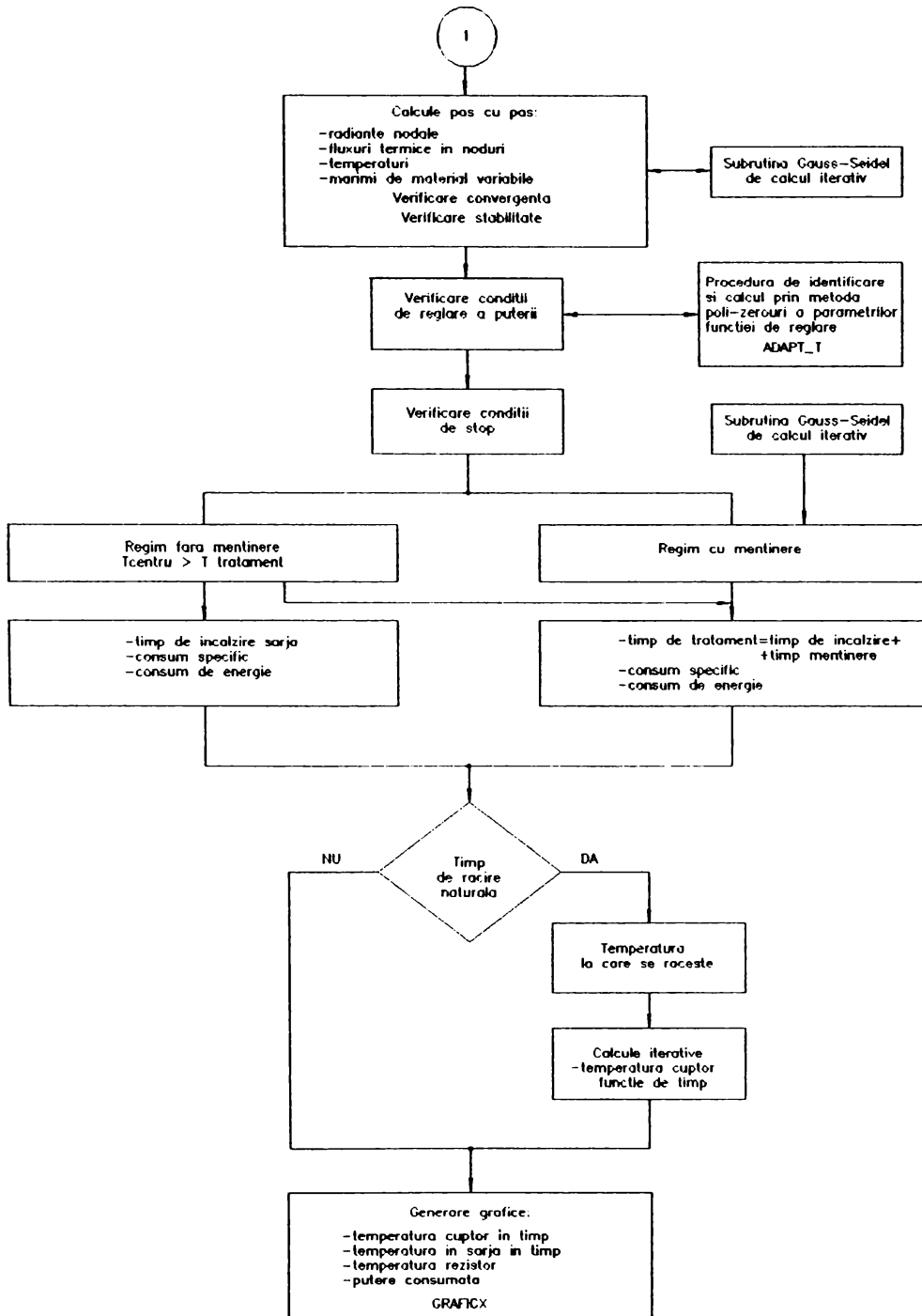


Fig.3.9 Model analogic pentru ansamblu cuptor șarjă model cuve

### III.7.3 Structura și algoritmul de programare pentru subprogramul SIMUL\_TERM





Date de intrare

Temperatura inițială a cuptorului gol	$\theta_{ic} =$ [°C](900-980)
Temperatura inițială a șarjei	$\theta_{is} =$ [°C]
Temperatura de tratament	$\theta_t =$ [°C](870-920)
Temperatura de răcire	$\theta_r =$ [°C](820-850)
Abaterea max. de la temperatura de tratament	$\Delta\theta_{\max} =$ [°C](5-20)
Abaterea min. de la temperatura de tratament	$\Delta\theta_{\min} =$ [°C](5-20)
Viteza de recirculare a gezelor	$v_g =$ [m/s](1-2)
Timpul de deschidere ușă (capac)	$t_{du} =$ [min](1-2)
Suprafața de deschidere ușă (capac)	$S_u =$ [m <sup>2</sup> ]
Emisivitatea șarjei	$\epsilon_s =$ (0.6-0.7)
Emisivitatea pereților izolanti	$\epsilon_p =$ (0.9-0.95)
Incrementul de timp	$\Delta t =$ [s] (5-10)
Numărul maxim de iterații	$H_{\max} =$ (100-1000)
Precizia de calcul	$\Delta =$ (10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-6</sup> )
Timp de menținere la palier	$t_p =$ [h] (0.5-1)

Subprogramul de simulare al încălzirii șarjei utilizează toate datele salvate prin rularea subprogramelor din amonte.

**Faza 1** Operații preliminare

a) Se preiau din fișierul SAV\_FV datele matricilor factorilor de vedere și suprafețelor

$$[F_{i-j}] \text{ și } [S_i]$$

b) Întocmirea vectorului cu coeficienții de emisivitate pentru suprafețele materiale care emit energia termică prin radiație:

$$[\epsilon_i]$$

Matricea tip vector este întocmită cu mărimi extrase din fișierele de materiale pentru suprafețele implicate sau cu mărimi prescrise ca date de intrare.

**Faza 2** Calculul valorilor inițiale de start

1\*) Calculul temperaturilor

a) Calculul temperaturii în nodurile de pe elementul de încălzire (rezistor)

$$\theta_r^{t=0} = \sqrt[4]{\frac{p_{sc} \cdot 10^{12}}{5,67 \times \epsilon_r \times F_{R-p}} + (\theta_c^{t=0} + 273)^4} - 273 \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.148)$$

unde:  $p_{sc}$  - încărcarea specifică corectată [W/cm<sup>2</sup>];  
 $\epsilon_r$  - emisivitatea rezistorului;  
 $F_{R-p}$  - factorul de vedere între rezistor și peretele refractar;  
 $\theta_c$  - temperatura în cuptor la momentul inițial (t=0) [°C];

b) Calculul temperaturilor în nodurile de pe pereții din spatele rezistoarelor [96]



$$\theta_p^{t=0} = \sqrt[4]{\frac{P_{sc} 10^{12}}{5,67 \times \epsilon_p \times F_{R-p}} + (\theta_p^{t=0} + 273)^4} - 273 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (3.149)$$

unde:  $\epsilon_p$  - emisivitatea peretelui;  
 $\theta_p$  - temperatura peretelui [ $^{\circ}\text{C}$ ]

c) Se întocmește matricea temperaturilor:

$$[\Theta_i]$$

La momentul inițial  $t=0$  se alocă următoarele valori de start

- pentru punctele din șarjă:

$$\theta_i = \theta_{is} \quad (\text{temperatura inițială a șarjei})$$

- pentru toate nodurile din cuptor "n+i" ( $i = 2, 4, 6, 9, 10, 11, 12, 13$ )

$$\theta_{n+i} = \theta_{ic} \quad (\text{temperatura inițială a cuptorului})$$

- temperatura măsurată de termocuplu

$$\theta_n = \theta_{ic}$$

- temperatura gazelor din cuptor

$$\theta_g = \theta_{ic}$$

- temperatura din rezistor: "n+i" ( $i = 1, 3, 5, 7$ )

$$\theta_{n+i} = \theta_{ic} \quad (\text{temperatura inițială a cuptorului})$$

d) Temperaturile din șarjă și pe suprafețele acestora sunt considerate egale cu temperatura inițială a șarjei  $\theta_{is}^{t=0}$  (fiind dată de intrare).

2°) Cu valorile calculate se întocmește matricea temperaturilor  $[\theta_i]$

a) Calculul radianțelor și emitanțelor termice

$$B_i^{t=0} = E_i = \sigma \epsilon_i (\theta_i^{t=0} + 273)^4 \quad [\text{W}/\text{m}_2] \quad (3.150)$$

în care:  $\sigma$  - constanta lui Stefan - Boltzmann,  $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4]$ ;

$\epsilon_i$  - emisivitatea suprafeței radiante;

$\theta_i$  - temperatura suprafeței radiante "i" [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$E_i$  - puterea de emisie a suprafeței radiante "i" [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

Se întocmește vectorul radianțelor termice și al emitanțelor termice.

$$[\mathbf{B}_i] \text{ și } [\mathbf{E}_i]$$

b) Se calculează conductanța termică la radiație spațială

$$G_{v, i-j} = F_{v, i-j} S_i [\text{m}^2] \quad (3.151)$$

și se construiește matricea

$$[\mathbf{G}_{i-j}]$$

c) Se calculează conductanțele termice la radiația suprafeței

$$G_{si} = \frac{\epsilon_i S_i}{1 - \epsilon_i} \quad [\text{m}^2] \quad (3.152)$$

### Faza 3

Calculare pas cu pas, funcție de valorile actuale ale temperaturilor.

În interiorul fiecărui increment de timp  $\Delta t$  se efectuează:

Pasul 1 Calcule pentru determinarea valorilor mărimilor de material variabile cu temperatura

- calculul coeficientului de schimb termic prin convecție la suprafață [12]:

$$\alpha_c = \left[ 2,3 + 195 \sqrt{\frac{v_g}{\theta_c^t + 273}} \right] \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{C}] \quad (3.153)$$

unde:  $v_g$  - viteza gazelor în cuptor (date de intrare) [m/s];  
 $\theta_g^t$  - temperatura atmosferei din cuptor [°C];  
 - calculul *căldurii masice* în metale (rezistor, șarjă)

$$c_i = c_0(1 + d \times \theta_i^t) \quad [\text{Wh/kg} \cdot \text{C}] \quad (3.154)$$

unde:  $c_0$  - căldura masică la temperatura mediului ambiant;  
 $d$  - coeficient de variație al căldurii masice cu temperatura [1/°C]  
 $\theta_i$  - temperatura în nodul material;  
 $c_0$  și  $d$  sunt date de fișier de material FELMAT.  
 - calculul *rezistenței electrice* a elementului încălzitor:

$$R_i = R_{20} [1 + (\theta_i^t - \theta_a) \xi] \quad [\Omega] \quad (3.155)$$

unde:  $R_{20}$  - rezistența elementului încălzitor la temperatura mediului ambiant;  
 $\theta_i$  - temperatura în nodul termic pe rezistor [°C];  
 $\theta_a$  - temperatura mediului ambiant [°C];  
 $\xi$  - coeficient de variație cu temperatura a rezistivității electrice;

$R_{20}$  și  $\xi$  sunt extrase din fișierul materialelor rezistive MATREZ  
 - calculul *conductanței termice globale* a cuptorului

$$G_{cp} = G_0 (\theta_c - \theta_a)^{A-1} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{C}] \quad (3.156)$$

unde:  $G_0$  - constantă (din fișierul SAV\_CUP);  
 $A$  - constantă exponențială din funcția de variație a pierderilor globale ale cuptorului (din fișierul SAV\_CUP);  
 $\theta_c$  - temperatura cuptorului [°C];  
 $\theta_a$  - temperatura mediului ambiant [°C];

### Pasul 2 Calculul capacităților termice concentrate

$$C_i = \gamma \Delta V \times c(\theta_i) \quad [\text{W} \cdot \text{C}] \quad (3.157)$$

unde:  $\gamma$  - masa volumică, considerată invariabilă cu temperatura [kg/m<sup>3</sup>] (date de fișier de material FELMAT);  
 $\Delta V$  - volumul elementar, corespunzător nodului termic [m<sup>3</sup>];  
 $c(\theta_i)$  - căldura masică la temperatura actuală  $\theta_i$ ;

NOTĂ: Se întocmește *matricea capacităților termice* [C<sub>i</sub>].

Capacitățile termice ale peretelui și rezistorului sunt preluate din subprogramele anterioare (SAV\_CUP, SAV\_REZ):

- C<sub>r</sub> - capacitatea termică a rezistoarelor;
- C<sub>p1</sub> - capacitatea termică a peretelui în stratul 1 al fiecărui perete.

### Pasul 3 Calculul radianțelor termice corespunzător suprafețelor radiante din cuptor și șarjă

Se rezolvă simultan, prin *metode iterative Gauss-Seidel*, următorul sistem de ecuații liniare exprimate în formă explicită [19] :

$$B_i^{t+1} = \frac{1 - \epsilon_i}{1 - F_{i-i}(1 - \epsilon_i)} \sum_{j \neq i} F_{i-j} B_j^t = \frac{\sigma \epsilon_i (\theta_i^t + 273)^4}{1 - F_{i-i}(1 - \epsilon_i)} \quad (3.158)$$

Criteriul de convergență este verificat pentru fiecare soluție în parte [75]:

$$\left| \frac{B_i^{t+1} - B_i^t}{B_i^t} \right| \leq \Delta \quad (3.159)$$

unde:  $B_i^{t+1}$  - radianța modului "i" la momentul actual t+1 [W/m<sup>2</sup>];  
 $B_j^t$  - radianțele modurilor "j" la momentul anterior t [W/m<sup>2</sup>];  
 $F_{i-j}$  - factor de vedere geometric;  
 $\sigma$  - constanta lui Stefan - Boltzmann;  
 $\epsilon_i$  - emisivitatea suprafeței "i";  
 $\theta_i$  - temperatura suprafeței "i";

#### Pasul 4 Calculul fluxurilor termice

a) Fluxul termic prin radiație [75]:

$$\Phi_{ri-j}^{t+1} = G_{vi-j} (B_i^t - B_j^t) \quad [W] \quad (3.160)$$

unde:  $B_i, B_j$  - radianțele termice ale suprafețelor "i" și "j" care schimbă energie prin radiație [W/m<sup>2</sup>];  
 $G_{i-j}$  - conductanța termică spațială (vezi relația 3.151) [m<sup>2</sup>]

b) Fluxul termic net prin suprafața de radiație [75]

$$[W] \quad (3.161) \quad \Phi_{si} = G_{si} (E_i - B_i)$$

unde:  $G_{si}$  - conductanța termică de suprafață (vezi relația 3.152) [m<sup>2</sup>];  
 $E_i$  - emitanța suprafeței radiante (vezi relația 3.150) [W/m<sup>2</sup>];  
 $B_i$  - radianța termică a suprafeței radiante (vezi relația 3.158) [W/m<sup>2</sup>]

c) Fluxul termic produs in rezistor prin efect Joule

$$\Phi_d^t = \frac{U^2}{R_t} \times n_{el} \quad [W] \quad (3.162)$$

unde:  $U^2$  - tensiune de alimentare a elementului încălzitor [V]  
 (din fișierul de date încălzitor SAV\_REZ);

$n_{el}$  - număr de elemente încălzitoare;  
 $R_t$  - rezistența electrică la cald [Ω];

d) Fluxul termic de conducție prin perete:

$$\Phi_{cpi} = G_{cp} [\theta_i - \theta_a] \quad [W] \quad (3.163)$$

unde:  $G_{cp}$  - conductanța termică globală pe unitatea de suprafață [W/°C];  
 $S_i$  - suprafața peretelui [m<sup>2</sup>];  
 $\theta_i$  - temperatura stratului 1 al peretelui [°C];  
 $\theta_a$  - temperatura mediului ambiant din exteriorul cuptorului [°C];  
 $i = k+2, k+4, k+6, k+8, k+9, k+10, k+11, k+12$

e) Fluxul termic la schimbul prin convecție la suprafață

$$\Phi_{cvi}^t = \alpha_{ci} \cdot S_i \cdot (\theta_i^t - \theta_a^t) \quad [W] \quad (3.164)$$

unde:  $\alpha_c$  - coeficientul de schimb termic prin convecție [W/m<sup>2</sup>·°C];

- $S_i$  - suprafața de schimb termic prin convecție [m<sup>2</sup>];  
 $\theta_i^t$  - temperatura suprafeței  $S_i$  [°C];  
 $\theta_g$  - temperatura gazelor considerată cea din cuptor [°C]

f) Fluxul termic pierdut prin ușa deschisă

$$\Phi_{du}^t = \epsilon_p \sigma S_u \left[ (\theta_i^t + 273)^4 - (\theta_{\text{ext}}^t + 273)^4 \right] \times t \quad [\text{W/h}] \quad (3.165)$$

unde:  $i = k+2, k+4, k+6, k+8, k+9, k+10, k+11, k+12, k+13$

- $\epsilon_p$  - emisivitatea pereților și a termocuplului;  
 $\theta_i^t$  - temperatura medie a pereților interiori ai cuptorului [°C];  
 $\theta_{Si}^t$  - temperatura inițială a șarjei (a mediului exterior) [°C];  
 $S_u$  - suprafața de deschidere ușă [m<sup>2</sup>]

Temperatura mediului exterior a fost considerată temperatura inițială a șarjei. În unele aplicații, cuptoarele pot prezenta o antecameră în care șarja poate suferi un proces de preîncălzire la temperatura din interiorul antecamerei.

Pasul 5 1\*) Calculul lui FACT.EL [38,113]

$$\text{FACT.EL} = K_R \Delta \theta^t + K_I \sum_{i=1}^{i \Delta t} \Delta \theta_i^t + K_D [\Delta \theta^t - \Delta \theta^{t-1}] \quad [\%] \quad (3.166)$$

Dacă  $\theta_1^t > \theta_c^t - [100 + \text{Abat}/\text{min}]$ ,  
 se activează procedura ADAPT\_T pentru calculul coeficienților funcției de reglare  $K_R$ ,  $K_D$  și  $K_I$  (conform subcapitolului 3.9)

$$\Delta \theta^t = \theta_{\text{cons}}^t - \theta_1^t, \quad (3.168)$$

2\*) Calculul comenzii puterii [38,162,166]

Dacă  $\text{FACT.EL} < 100$ ,

atunci se calculează:

2a) timpul de conducție

$$t_c = \text{FACT.EL}, \quad [\text{s}] \quad (3.169)$$

urmând ca pentru primii

$$i = t_c / \Delta t \quad \text{incrementi} \\ \text{FACT.EL}^{t+i} = \text{FACT.EL}^t \quad (3.170)$$

2b) timpul de neconducție

$$t_{nc} = 100 - \text{FACT.EL} \quad [\text{s}] \quad (3.171)$$

urmând ca pentru următorii

$$i + t_{nc} / \Delta t \quad \text{incrementi} \\ \text{FACT.EL} = 0 \quad (3.172)$$

Pasul 6 Calculul fluxurilor reziduale în nodurile termice

Pentru fiecare nod se determină la fiecare pas de timp valoarea fluxurilor reziduale [75]:

$$\varphi_i = \sum_{j=1}^j \phi_{i-j} + \phi_{ei} + (1-f) \times \text{FACT.EL} \times \phi_{di} + \phi_{cv} + \phi_{cdi-k} + (1-f) \times \phi_{du} \quad [\text{W}] \quad (3.173)$$

unde:  $\Phi_{di}^{t+1}$  - reprezintă fluxul termic generat în modul "i" (în cazul acesta flux este chiar puterea electrică);

$\Phi_{i-j}^{t+1}$  - suma fluxurilor termice pierdute prin radiație către

- suprafețele "j" [W];
- $\Phi_{cvl}^t$  - fluxul termic pierdut prin convecție la suprafața în nodul "i" [W];
- $\Phi_{cdi-k}$  - fluxul termic pierdut prin conducție (cazul nodurilor de pe pereții cuptorului sau al șarjei) în nodul "i" [W];
- $\Phi_{ai}$  - căldura acumulată în modul "i" [W/h];
- $\Phi_{dui}$  - fluxul termic pierdut prin radiația nodului "i" la deschiderea ușii sau capacului cuptorului [W/h];
- f - factor care primește valoarea 1 când ușa este închisă și valoarea 0 când ușa este deschisă.

### Pasul 7 Calculul noilor temperaturi

#### 7a) *Calculul temperaturii în nodurile termice din cuptor*

$$\theta_i^{t+1} = \theta_i^t + \frac{\Delta t}{3600 C_i} \varphi_i \quad (3.174)$$

- unde:
- $\theta_i^{t+1}$  - temperatura actuală în nodul "i" [°C];
- $\theta_i^t$  - temperatura anterioară în nodul "i" [°C];
- $\varphi_i$  - fluxul rezidual în nodul "i" [W];
- $\Delta t$  - incrementul de timp [s];
- $C_i$  - capacitatea termică concentrată a nodului "i" [W/h].

#### 7b) *Calculul temperaturii măsurate de termocuplu [42]*

$$\theta_m^{t+1} = 100 \sqrt{\sqrt{\left(\frac{\theta_{k+13}^{t+1} + 273}{100}\right)^4 - \frac{\varphi_{r,k+13}^t}{\text{FACT.TERM} \times H_{it}}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.175)$$

- unde:
- $\theta_{k+13}^{t+1}$  - temperatura la suprafața fictivă (k+13) în punctul de detecție a temperaturii prin termocuplu;
- $\varphi_{r,k+13}^t$  - fluxul rezidual în nodul k+13 la momentul de timp anterior;
- $H_{it}$  - adâncimea de imersie a termocuplului [m];
- FACT\_TER - factor de corecție care ține cont de caracteristicile geometrice ale termocuplului (diametru țevă de protecție, grosime teacă și grosime conductor). Pentru un termocuplu reprezentativ având teaca din oțel refractar de  $\phi 22\text{mm}$ , cu grosime a sudurii calde de 3,5 mm, acest factor are o valoare calculată de 1,35.

#### 7c) *Calculul temperaturii gazelor din cuptor [42]*

$$\theta_g^{t+1} = \theta_{k+13}^{t+1} - \frac{1,35 H_{it}}{\alpha_c} \left[ \left( \frac{\theta_{k+13}^{t+1} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_m^{t+1} + 273}{100} \right)^4 \right] \quad [^\circ\text{C}] \quad (3.176)$$

- unde
- $\alpha_c$  - reprezintă coeficientul de convecție forțată calculat la pasul 1 [W/m<sup>2</sup>°C];

**Pasul 8 Verificarea condițiilor de stabilitate [56]**

La fiecare pas de timp se verifică *condiția de stabilitate*:

$$\Delta t \leq \min(\tau_i) \quad (3.177)$$

unde:  $\{\tau_i\}$  - este *șirul constantelor de timp* calculate cu formula:

$$\tau_i = \frac{c_i}{(\sum G_{ij}) 3600} \quad [\text{s}] \quad (3.178)$$

unde:  $C_i$  - capacitatea termică concentrată a modului termic [Wh/°C];  
 $\sum G_{ij}$  - suma conductanțelor termice ce converg în nod [W/°C].

Dacă această condiție nu este îndeplinită, pentru fiecare nod termic material în parte, atunci la pasul de timp următor valoarea incrementului de timp se va modifica și va lua valoarea celei mai mici constante de timp calculate.

**Pasul 9 Se activează procedura de acordare a lui FACT\_EL**

Se rulează procedura ADAPT\_T determinare a parametrilor funcției de reglare.

**Pasul 10 Calculul consumului de energie până la un moment de timp dat**

$$[\text{Wh}] \quad (3.179) \quad E_c = \sum_{t=0}^{t_{\text{calcul}}} \text{FACT.EL} \times \Phi_{e1} / 3600$$

**Faza 4 Calculul consumului specific**

$$W_s = \frac{E_c}{G_{bs}} \quad [\text{Wh/kg}] \quad (3.180)$$

unde:  $G_{bs}$  - reprezintă greutatea șarjei brute [kg];

**Faza 5 Afișarea diagramelor și rezultatelor**

Sunt generate și afișate pe ecran, cu datele salvate în fișierul **TEMPLUC**:

a) Temperatură funcție de timp, pentru:

- temperatura elementului de încălzire
- temperatura la suprafața șarjei
- temperatura în centrul șarjei
- temperatura în punctul de măsură cu termocuplul

$$\begin{aligned} \theta_t &= f(t); \\ \theta_s^{\text{supr}} &= f(t); \\ \theta_s^{\text{centr}} &= f(t); \\ \theta_m &= f(t); \end{aligned}$$

b) Puterea funcție de timp

$$P_{el} = f(t);$$

Opțional se poate vizualiza prin efect de lupă după axa timpului porțiuni din diagrama finală, pentru o durată de timp de **max.1h**.

Sunt afișate pe ecran sub formă de tablou:

- Timpul de încălzire
- Timpul de răcire
- Consumul de energie pe ciclu
- Consumul specific pe ciclu de tratament

$$\begin{aligned} t_{ih} &= [\text{h}]; \\ t_r &= [\text{h}]; \\ E_c &= [\text{Wh}]; \\ W_s &= [\text{Wh/kg}]. \end{aligned}$$

### III.8 FUNCȚIILE ȘI STRUCTURA PROGRAMULUI SIMUL\_CARB

Tratamentele termice cele mai importante ce se realizează numai în cuptoare electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare, sunt cele care implică un mediu de tratament diferit de aer. De altfel, cele mai răspândite cuptoare sunt cele destinate tratamentelor termochimice sub atmosfere controlate.

Unul din aceste tratamente îl reprezintă *tratamentele termochimice de carburare în mediu gazos*, în scopul cementării prin călire în ulei. Acest proces este un proces extrem de complex și de delicat deoarece implică controlul a doi parametri diferiți de proces, atât prin natura fizică cât și prin modul de acțiune, respectiv unul este temperatura, iar celălalt este conținutul de masă carbonică implicată în transferul de masă. Acești parametri au multe elemente comune: sunt controlați și reglați în afara mediului material în care are loc procesul propriu-zis (pisa de tratat) și nu sunt mărimi măsurabile direct prin senzori în interiorul materialului.

Activitatea transferului și difuziei masice este puternic influențată de temperatura piesei iar activitatea atmosferei din cuptor depinde de temperatura acestuia.

Prin simularea procesului de încălzire, se obțin elemente tehnologice deosebit de importante, sub aspectul optimizării ciclului de încălzire, însă insuficiente unui ciclu de tratament termochimic. Acesta impune anumite condiții de temperatură în șarjă, o anumită uniformitate a acesteia în întreaga masă a șarjei și o anumită durată în timp pentru realizarea condițiilor tehnologice finale. Pe de altă parte și procesul de transfer de masă poate avea propriile criterii de optimizare a duratei tratamentului și a consumului de fluide tehnologice, prin asigurarea unor condiții termice.

#### III.8.1 Destinația și funcțiile programului SIMUL\_CARB

Programul este destinat optimizării ciclurilor de tratament termochimic de cementare în mediu gazos, în condițiile realizării acestuia în cuptoare cu încălzire electrică. Acest program este conceput pentru a fi utilizat ca sursă, fie de procesare *on-line*, sub controlul evoluției reale a parametrilor implicați în proces (*temperatură și potențial de carbon*), fie de generare *off-line* a diagramei optime de procesare.

Funcțiile principale ale programului sunt:

a) *Determinarea pe baza datelor tehnologice referitoare la calitățile finale ale produsului tratat și a unor timpi obținuți prin simularea termică, a mărimilor de referință pe faze de proces pentru potențialul de carbon din incinta cuptorului;*

b) *Simularea procesului transferului de masă la suprafața piesei și de difuzie în strat, la pași egali de timp; pe baza evoluției difuziei de carbon în metal se iau decizii privind trecerea la alte faze ale procesării, care implică alte referințe și alte condiții de control;*

c) *Generarea diagramelor optime de procesare, atunci când sunt îndeplinite condițiile finale de tratament, prescrise tehnologic (atingerea unui anumit conținut de carbon la o anumită adâncime de pătrundere și cu o anumită distribuție uniformă a acestuia în stratul de metal avînd originea la marginea piesei).*

Meniul principal pentru **SIMUL\_CARB**

<b>PROGRAMARE</b>	- <i>program executabil</i> destinat simulării pas cu pas a difuziei carbonului.
<b>FISIERMAT</b>	- <i>program executabil</i> ce permite accesul în fișiere de date pentru completare, modificare sau ștergere

Submeniul pentru **FISIER** (bază de date - \*.dbf):

<b>REPERE</b>	- <i>stocare date</i> geometrice și tehnologice pentru repere de tip mărunț (bucși, role).
<b>MATERIALE</b>	- <i>stocare date materiale metalice</i> (marca, furnizor, temp.max. de utilizare, masă volumică, căldură masică, conductivitate termică cu coeficienți specifici compoziției chimice, gradului și factorului de aliere).

Subprograme în **SIMUL\_CARB**

<b>DATEPROC</b>	- <i>introducere date</i> tehnologice de procesare.
<b>FAZEPROC</b>	- <i>introducere date</i> pe faze de proces.
<b>SIMULCARB</b>	- <i>unit simulare</i> prin algoritm de optimizare a difuziei carbonului.

Subprogram de generare grafice în **SIMUL\_CARB**

<b>FRANJ</b>	- <i>generare diagramei difuziei</i> carbonului în strat la pași de timp - lmin.
<b>GRAPHTEMP</b>	- <i>generare diagrame temp. și potențial de carbon</i> optimizate.
<b>STRUCT</b>	- <i>generare diagrama finală</i> a distribuției durității în strat.

III.8.2 Precizări privind algoritmul de programare în **SIMUL\_CARB**

Algoritmul de programare conține o serie de *elemente de natură pur metalurgică*, fără a căror considerare nu se putea realiza un program util destinat optimizării regimului de procesare. Astfel:

a) Prin introducerea șarjei reci în cuptor temperatura cuptorului scade și apare *pericolul formării și depunerii de funingine*. Din acest motiv introducerea gazului metan de îmbogățire cu carbon se întârzie până la restabilirea temperaturii în incinta cuptorului.

Procesul de carburare se lansează când temperatura șarjei atinge o anumită valoare (800-880°C). Atunci când este implicată o șarjă formată din piese



divizate condiția de calitate optimă este ca șarja să fie la o temperatură uniformă, deci un al doilea factor de întârziere în lansarea procesului;

b) Din considerente de optimizare a duratei ciclului de carburare și a reducerii consumurilor, în prima fază a procesului se poate funcționa cu o referință superioară pentru potențialul de carbon, controlând conținutul de carbon la suprafața piesei sub *limita de saturație*, care depinde de *factorul de aliere a materialului pieselor*;

c) După atingerea unei adâncimi de carburare prescrisă (vezi Fig.3.10) urmează o fază de difuzie a carbonului în strat pentru a uniformiza distribuția carbonului, fază controlată după o referință care reprezintă *conținutul final de carbon la margine*;

d) Procesul se finalizează cu o reducere a temperaturii șarjei pentru realizarea condiției de călire, fază în care este necesar introducerea aerului tehnologic pentru a corecta potențialul de carbon influențat de scăderea temperaturii din cuptor.

Metoda de simulare este de calcul pas cu pas, utilizând metoda de discretizare în diferențe finite și de calcul iterativ a sistemului de ecuații exprimate în formă explicită pentru conținutul de carbon în fiecare strat, suplimentat cu ecuația de schimb de masă la margine. În interiorul fiecărui increment de timp se corectează coeficientul de difuzie care depinde atât de temperatură cât și de conținutul de carbon.

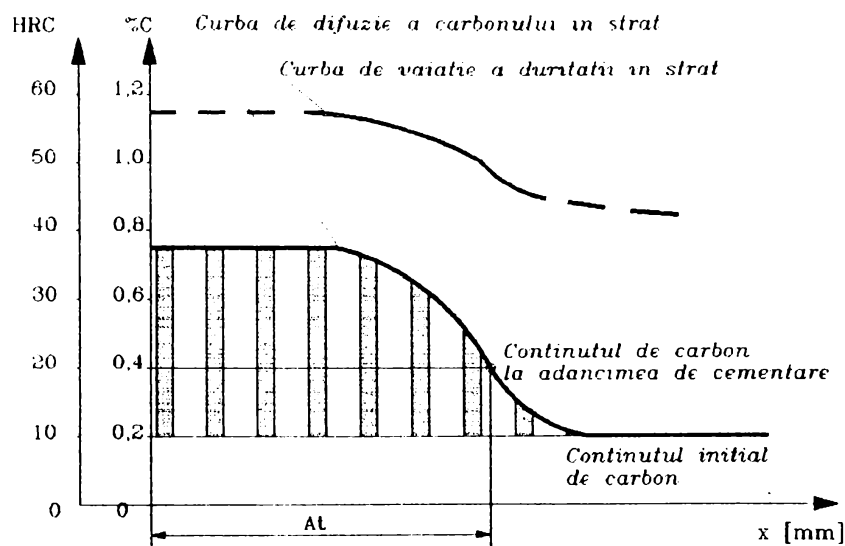
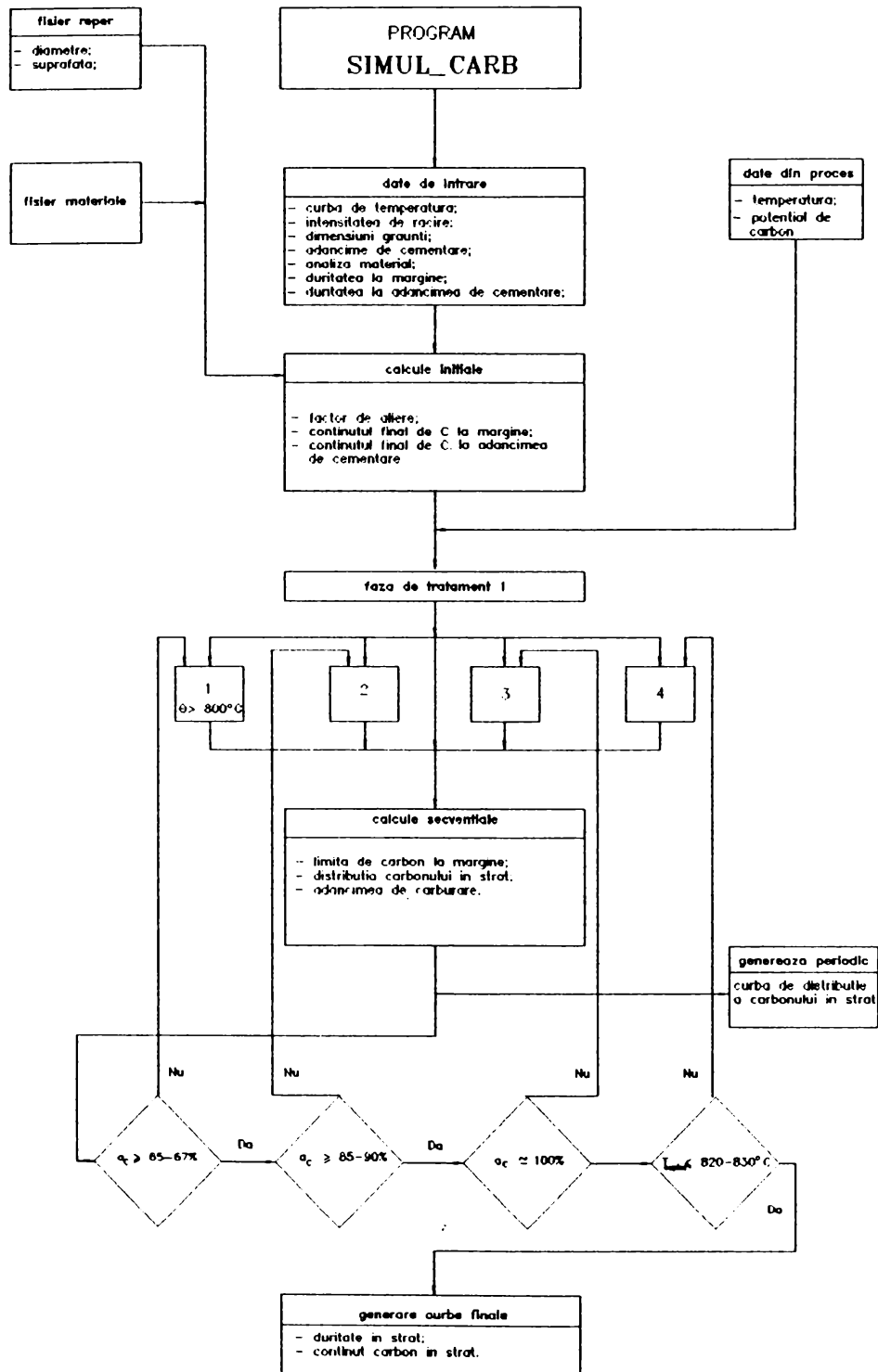


Fig.3.10 Distribuția finală a carbonului în strat și a durității.

### III.8.3 Structura și algoritmul de programare pentru programul SIMUL\_CARB



## Date de intrare

Temperatura inițială a cuptorului:	$\theta_i$ [°C];(700-750)
Temperatura de menținere:	$\theta_m$ [°C];(870-920)
Temperatura de călire:	$\theta_c$ [°C];(820-840)
Viteza de încălzire cuptor- șarjă:	$v_i$ [grad/h];
Viteza de răcire cuptor- șarjă:	$v_r$ [grad/h];
Adâncimea de cementare:	$A_c$ [mm];
Duritatea finală la margine:	$J_{of}$ [HRC];(60-52)
Duritatea finală la adâncimea de cementare:	$J_{fAc}$ [HRC];
Intensitatea de călire:	$[H_c]$ ; (0,3;0,6;0,9)
Dimensiunea grăuntelui:	$G$ [ASTM];
Temperatura de lansare carburare:	$\theta_{ic}$ [°C];(800-880)
Increment spațial:	$\Delta x$ [mm];(0.1)
Increment de timp :	$\Delta t$ [min] (1-5)

## Faza 1 Calcule inițiale [65,145,146]

- Se calculează numărul incrementelor spațiale

$$\frac{1,5 A_c}{\Delta x} = n_i \quad (3.181)$$

a) Calculul factorului de aliere utilizând formula lui Gunnarson [65]:

$$a = \lg(C_p/C_s) = 0,55[\%Si] + 0,014[\%Ni] - 0,013[\%Mn] - 0,04[\%Cr] - 0,013[\%Mo] \quad (3.182)$$

de unde:

$$(3.183) f_a = \frac{1}{10^a} = \frac{C_s}{C_p}$$

unde:  $C_p$  - potențialul de carbon în mediul cuptorului pentru fierul pur (activitatea carbonului în metal,  $a_c = 1$ ) [%];  
 $C_t$  - potențialul de carbon în mediu la echilibru pentru un oțel aliat [%];

b) Calculul limitei de saturare

$$C_s = \frac{C_p}{r f_a} \quad [\%] \quad (3.184)$$

c) Adâncimea Jominy de cementare prin călire [65]:

$$\log E = [0,23581 - 0,28155 \ln H_c + 0,18904 \sqrt{H_G} - 0,000092 D] \log D = b \quad (3.185)$$

unde:  $H_c$  - intensitatea de călire (se alege 0,3; 0,6; 0,9);  
 $D$  - diametrul echivalent al piesei [mm];

$$\text{de unde: } E = 10^b \quad [\%] \quad (3.186)$$

d) Conținutul final de carbon la suprafața piesei carburate utilizând formula simplificată a lui Jominy [65]:

$$C_{fs} = [J_0 - 20]^2 \quad [\%] \quad (3.187)$$

unde:  $J_0$  - duritatea finală la suprafața [HRC];

Se calculează mărimea de manevră:

$$c = [20(\%Cr) + 6,4(\%Ni) + 19(\%Mn) + 34(\%Mo) + 28(\%V) + 5(\%Si) + 24E\sqrt{E} + 2,86E - 0,85G - 1] \quad (3.188)$$

iar apoi, din ecuația:

$$J_{AC} = 98 \sqrt{C_{fAC}} - 0,025E^2 C_{fAC} \quad (3.189)$$

se obține:

unde:  $E$  - adâncimea Jominy [mm];  
 $J_{AC}$  - duritatea în strat la adâncimea de cimentare [HRC];  
 $G$  - dimensiunea grăuntelui [ASTM];

e) Momentul de timp de la introducerea șarjei în cuptor după care se introduce gaz metan de adaus:

$$t_1 = \left[ \frac{\theta_i - 780}{v_i} \right] \quad [h] \quad (3.190)$$

unde:  $\theta_i$  - temperatura inițială în cuptor după introducerea șarjei [°C];  
 $v_i$  - viteza de creștere în temperatură a cuptorului cu șarjă [°C/h];

## Faza 2

Calculare iterative pas cu pas ( $t = t_i + n\Delta t$ ) [145,146,147]

unde:  $\Delta t = 1$  min, în cazul fiecărui increment de timp

Se urmează secvențele de ciclu din Fig. 5.2, iar elementele de calcul au semnificația din Fig.3.10

Secvența 1°) Când  $\theta_c^t \geq \theta_{ic}^t$

Se calculează în pași:

a) *Limita de formare funingine:*

$$C_{pf}^{t+1} = 0,00317 \theta_c^t - 1,68 \quad [\%] \quad (3.191)$$

și se indexează referința potențialului de carbon din cuptor  $C_{p1} = C_{pf} 0,8$

b) Se calculează *coeficientul de difuzie carbon în piesă* [65]:

$$D^{t+1} = 0,47 \exp \left[ -1,6C_{ci}^t - \frac{37000 - 6600C_i^t}{RT^{(t)}} \right] \quad [cm^2/s] \quad (3.193)$$

unde:  $C_i$  - conținutul de carbon inițial [%];  
 $R$  - constanta universală a gazelor;  
 $T$  - temperatura piesei [K].

c) Se calculează *distanța de fugă la suprafață* a masei de carbon [65]:

$$s^{t+1} = - \frac{D^t}{\beta} \quad [cm] \quad (3.194)$$

unde:  $\beta$  - coeficient de transfer de carbon la suprafață  
 $\beta = (1,0 \div 1,3) 10^{-5}$  [cm/s] (3.195)

d) Se calculează pentru  $k = 1 \dots n_i$ , *conținutul de carbon în fiecare strat*  $(\Delta x)_k$  [146]:

$$\text{Dacă: } C_x^t = \frac{C_k^{t+1} - C_k}{C_{p1} - C_k} \quad (3.196)$$

$$0,05 < C_x^{t+1} < 0,3 \quad (3.197)$$

pentru fiecare:  $x + k\Delta x + s$  [mm] (3.198)

$$C_x^{t+1} = \frac{\sqrt{D\Delta t}}{x + \Delta x + s} - 0,37 \quad (3.199)$$

și se formează sistemul de ecuații:

$$C_k^{t+1} = C_x^{t+1} (C_{p1} - C_k^t) + C_k \quad [\%] \quad (3.200)$$

Dacă:

$$0,3 < C_x^t < 1,0 \quad (3.201)$$

atunci, pentru fiecare  $x + k\Delta x + s$  [mm]

$$C_x^{t+1} = 1 - \frac{x + \Delta x + s}{2,13\sqrt{D\Delta t}} \quad (3.202)$$

Se formează sistemul de ecuații

$$C_k^{t+1} = C_x^{t+1} (C_{p1} - C_k^t) + C_k \quad [\%] \quad (3.203)$$

Se rezolvă sistemul de ecuații prin procedura de iterații Gauss-Seidel.

Se formează matricea vector:

$$[C_k^{t+1}]$$

e) Se calculează *adâncimea de cimentare* pentru care s-a atins conținutul final de carbon în strat [146]:

$$A_c^{t+1} [C_k^{t+1} = C_{fAC}] = x + k\Delta x + s \quad (3.204)$$

dacă:

$$C_x^{t+1} = \frac{C_k^{t+1} - C_k}{C_{p1} - C_k} \quad (3.205)$$

$$0,03 < C_x^{t+1} < 0,5$$

$$A_c^{t+1} = \frac{\sqrt{D\Delta t}}{0,37 + C_x^{t+1}} \quad (3.206)$$

și dacă:

$$0,3 < C_x^{t+1} < 1,0 \quad (3.207)$$

$$A_c^{t+1} = 2,13(1 - C_x^{t+1})\sqrt{D\Delta t} \quad (3.208)$$

Se calculează raportul:

$$\frac{A_c}{A_c^{t+1}} 100 \quad [\%] \quad (3.209)$$

f) Se verifică *conținutul de carbon la suprafață*

$$C_1^{t+1} \leq C_s \times 0,9 \quad (3.210)$$

Dacă condiția nu este îndeplinită, se trece la secvența 2\*) a ciclului de tratament **Secvența 2\*)** Referința pentru potențialul de carbon din atmosferă este

$$C_p(z) = f(t) \quad (3.210)$$

Se calculează în pași:

a) Se calculează coeficientul de difuzie  $D^{t+1}$  (ec.3.195)

b) Se calculează distanța de fugă  $s^{t+1}$  (ec.3.196)

c) Se calculează *potențialul de carbon din atmosfera cuptorului*

$$C_{p2}^{t+1} = \frac{C_1^t - C_1}{C_x^t} + C_1 \quad [\%] \quad (3.212)$$

d) Se calculează pentru fiecare  $k = 1 \dots n_i$  conținutul de carbon în strat (secvența 1 -pasul d) și adâncimea de cementare (secvența 1 -pasul e), cu specificarea că în acest caz:

$$C_{p1} = C_{p2}(t) \quad (3.213)$$

e) Se verifică:

$$\frac{A_c}{A_c^{t+1}} 100 \leq (80\% + 85\%) \quad (3.214)$$

Dacă condiția este îndeplinită, se reiau calculele pentru pasul de timp următor. Dacă condiția nu este îndeplinită, atunci se trece la secvența de ciclu următoare.

**Secvența 3\***) Se trece referința potențialului de carbon din cuptor la  $C_{pj} = C_{fs}$  (conținutul final la suprafață). Aceasta corespunde fazei de difuzie. Se repetă secvența 1, pașii c și d, cu specificarea că  $C_{pj} = C_{fs}$  și  $S = 0$

Dacă:

$$\frac{A_c}{A_c^{t+1}} 100 \geq 95 \quad (3.215)$$

atunci se comandă secvența următoare de ciclu.

**Secvența 4\***) Se reduce temperatura din cuptor de la temperatura de menținere la temperatura de călire cu menținerea condiției  $C_{pd} = C_{sf}$

a) Se calculează temperatura la pasul de timp următor

$$T_f^{t+1} = T_p^t - v_2 \Delta t \quad [K] \quad (3.216)$$

b) Se repetă pașii de calcul de la secvența 1, pașii d și e

c) Când  $T_c^{t+1} \leq T_{c\text{ălire}}$ , atunci se comandă STOP simulare

### Faza 3

Se efectuează calculele finale

a) Cu ultimele valori din matricea  $[C_k]$  se calculează duritatea pentru  $k = 1 \dots n_i$  cu formulele [65]:

$$J_1 = \sqrt{c_1} + 20 \quad [\text{HRC}] \quad (3.217)$$

$$J_{k(k+1)} = d + 98 \sqrt{C_k} - 0,025 E^2 C_k \quad (3.218)$$

unde  $\Delta$  este dată în ec.(3.189)

b) Se formează vectorul  $[J_k]$

### Faza 4

Se afișează pe ecran diagrama finală a distribuției carbonului în strat  $C_1 = f(x)$  și a distribuției durității finale  $J_1 = f(x)$

NOTĂ: În cadrul fazei 2, după fiecare pas de timp, se afișează pe ecran curba  $C_1 = f(t, k\Delta x)$ , cu specificarea valorilor pentru referința potențial de carbon, secvența de ciclu, temperatură, adâncime relativă de carburare.

### Faza 5

Se generează pe ecran curba optimă de tratament

### III.9 FUNCȚIILE ȘI STRUCTURA PROGRAMULUI ADAPT\_T:

Pentru a îndeplini atât cerințele de ordin calitativ tehnologic cât și necesitățile de natură energetică în procesele de tratament termic nu sunt suficiente stabilirea unor proceduri de optimizare a ciclurilor de tratament, fiind necesară asigurarea în condițiile unei procesări reale a unei funcții care să asigure controlul derulării procesului în condițiile prestabilite sau care să facă față unor situații aleatorii, provenite prin *perturbații de natură internă sau externă procesului*.

Comanda de furnizare a puterii electrice este variabilă pe durata ciclului de încălzire, ea devenind teoretic constantă la atingerea regimului staționar, când se solicită doar acoperirea pierderilor cuptorului.

Tratarea analitică a situațiilor pe durata unui ciclu de tratament, este practic de nerezolvat sub presiunea timpului, extrem de scurt, în care trebuie intervenit pentru acordarea parametrilor regulatorului pentru anularea efectelor provocate de aceste perturbații.

O serie de factori perturbatori nu pot fi identificați ușor. Se impune necesitatea creării unui instrument matematic de analiza și decizie care să asigure identificarea anticipată a parametrilor caracteristici procesului, să realizeze determinarea și acordarea parametrilor funcției de reglare la valorile optime și nu în ultimul rând să readapteze acești parametri ori de câte ori apar perturbații a căror amplitudine și durată pot conduce la o funcționare instabilă cu consecințe tehnologice și energetice de nedorit.

Cuptoarele electrice industriale au prim element de perturbare frecvență și de durată însăși șarja de tratat, prin capacitatea cu variație nelineară în timp de acumulare.

Din aceste motive, timpul de reglare pe principii analogice este insuficient, fapt pentru care trebuie create legi de reglare numerică pe baza unui algoritm inteligent care să realizeze autoadaptarea parametrilor funcției de reglare ori de câte ori se impune ca necesar.

#### III.9.1 Destinația și funcțiile programului ADAPT\_T

Programul este destinat *identificării și autoacordării adaptive a parametrilor funcției de reglare a temperaturii*; prin aceasta se furnizează timpii optimi de conducție a echipamentelor de comandă a puterii.

*Funcțiile principale* ale programului sunt:

- a) *Identificarea*, la o primă acordare, a parametrilor funcției de reglare pentru un regulator cu comportare PID;
- b) *Reacordarea parametrilor funcției de reglare* în apropierea temperaturii de lucru și furnizarea *on-line* a comenzii puterii electrice de încălzire proporțional cu mărimea abaterii dintre temperatura măsurată și cea prescrisă ca referință;
- c) *Activarea procedurii de determinare a parametrilor funcției de reglare* ori de câte ori este depășit un prag superior sau inferior, în raport cu mărimea de referință și reacordarea parametrilor la noile valori dacă perturbația persistă în timp și în amplitudine.

## Subprograme în ADAPT\_T.

ADAPT.CPP	- <i>modulul principal</i> al programului de reglare autoadaptivă
JEYS.H	- <i>definire coduri</i> tastatură recunoscute prin bioskey
SERIAL.H	- <i>declarații pentru</i> comunicație serială
SERIAL.C	- <i>funcții pentru</i> comunicație serială
TIMER.H	- <i>declarare clasă</i> de timp
TIMER.CPP	- <i>funcția clasei</i> de timp
GWINMENU.H	- <i>declarare meniuri</i>
GWINMENU.CPP	- <i>declarații legate</i> de interfața grafică
CHART.H	- <i>declarare grafice</i>
CHART.CPP	- <i>declarare funcții</i> grafice
COLORS.H	- <i>definire culori</i> pentru mono/color

## III.9.2 Precizări privind algoritmul de programare în ADAPT\_T

Identificarea parametrilor de proces, pentru *sisteme de ordinul 2* se realizează la începutul încălzirii [163], atunci când la intrare se aplică un semnal treaptă de putere maximă (100%).

În prima fază sunt determinați timpul mort, factorul de amplificare a cuptorului și apoi constantele de timp utilizând metoda aproximare prin regula celor mai mici pătrate. În acest scop sunt achiziționate din proces 10 valori ale temperaturii, când cuptorul este pe panta de încălzire, citite la intervale succesive de timp cu pasul  $\Delta t=1\text{min}$ .

Odată determinate constantele de timp se procedează la proiectarea unui *estimator de proces de ordinul 2* utilizând metoda de optimizare a funcției de reglare pe criterii de stabilitate prin procedura de *alocare a polilor și zerourilor* funcției de transfer a procesului [111,112].

În Fig.3.11 este reprezentată schema unui estimator *on-shot* pentru sistemul de ordinul 2 adoptat pentru procesul de încălzire, cu predictor și un regulator PID .

În Fig.3.12 este prezentat principiul adoptat pentru autoacordarea *on-line* a parametrilor regulatorului, prin algoritm autoadaptiv, ori de câte ori este alertat un prag de control. Sunt determinate constantele de



proporționalitate, de integrare și de derivare a funcției de reglare.

Pentru a atenua efectul dinamic al timpului mort în procesul de reglare, valoarea timpului mort se poate elimina și utiliza în schimb un *predictor-corector* cu scopul de a determina cu predicție valoarea mărimii de ieșire la pasul de timp ulterior [111,112].

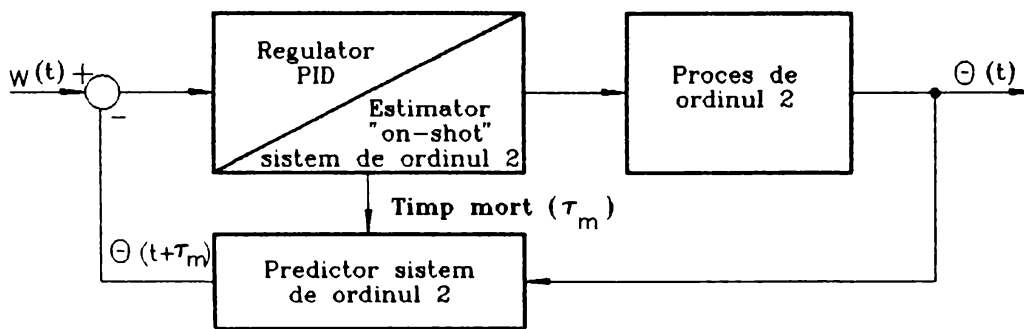


Fig.3.11 Varianta de estimator implementat în algoritmi

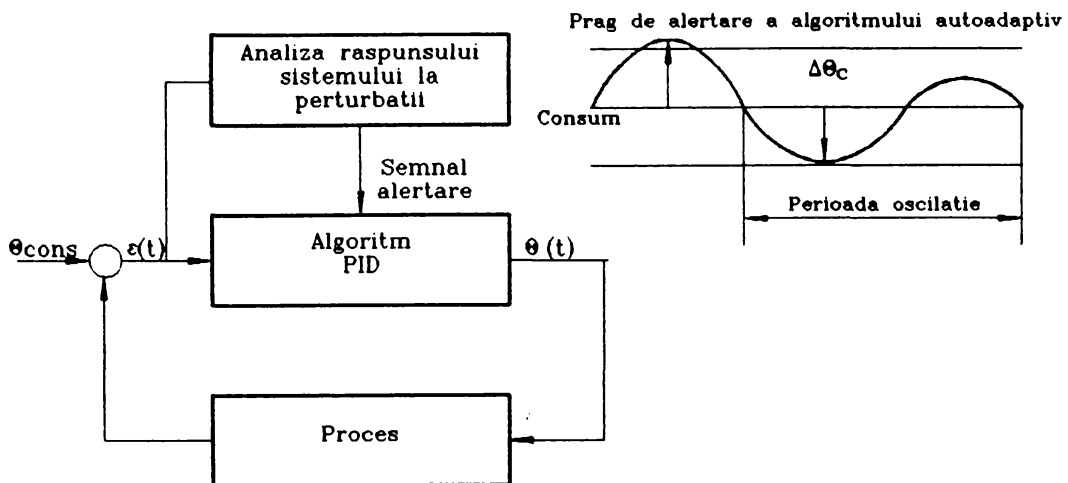
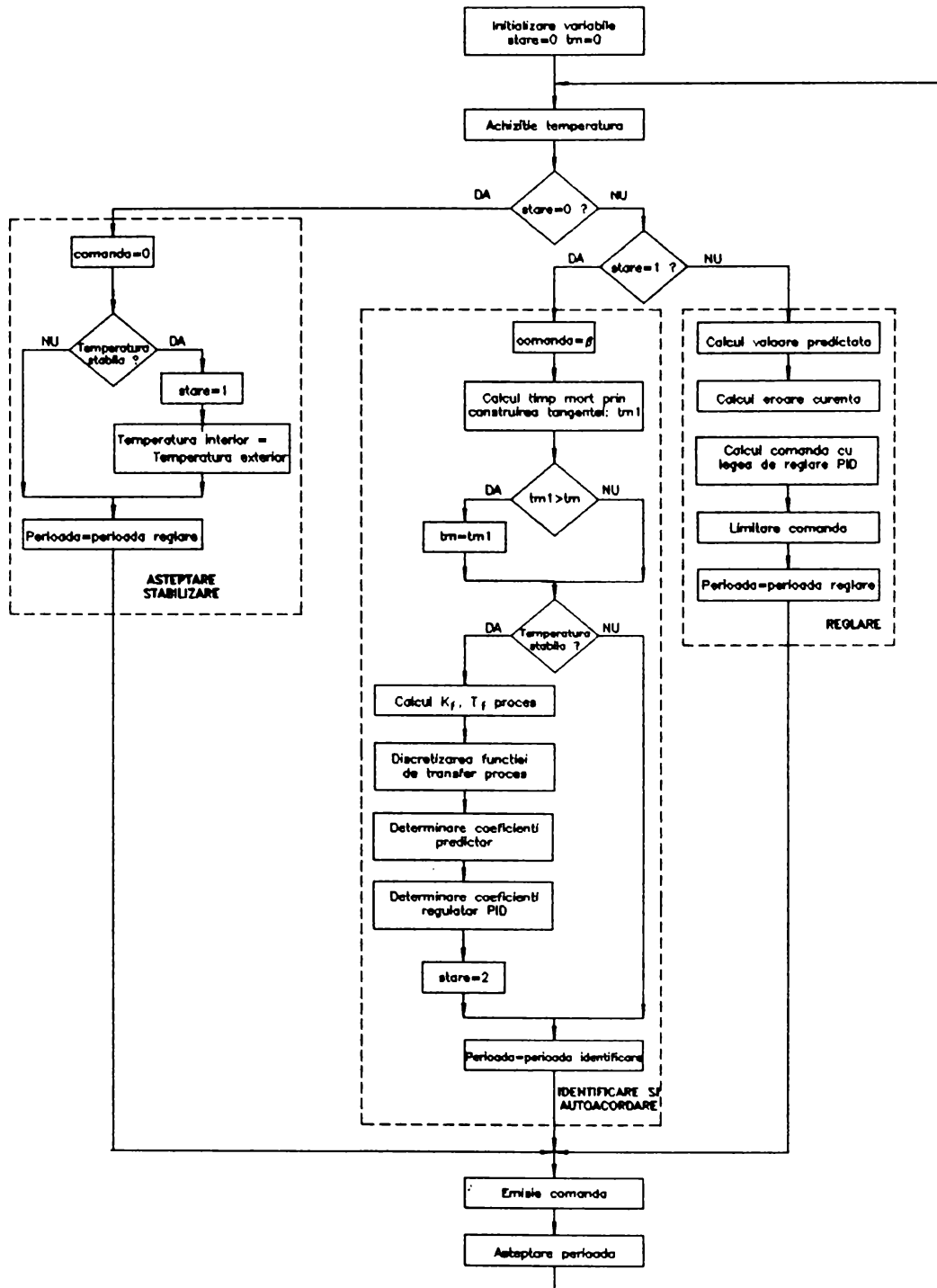


Fig 3.12 Principiul reglării autoadaptive

III.9.3 Structura și algoritmul de programare pentru programul ADAPT\_T.



## Date de intrare

Referință temperatură maximă	[°C];(100-1300)
Perioada de identificare	[s];(1-10)
Perioada de reglare	[s];(1-5)
Comanda maximă	[kW](100-200)

**Faza 1** - Calculul timpului mort al sistemului prin metoda tangentei la curbă în punctul de inflexiune  $y = f(t)$

$$\tau_i = t_i - \frac{y_{1i}(t_{2i} - t_{1i})}{y_{2i} - y_{1i}} \quad (3.219)$$

și se alege:  $\tau_m : \max(\tau_i)$  (3.220)

**Faza 2** - Calculul constantelor de timp  $T_1$  și  $T_2$  ale funcției de transfer pentru sistem de ordinul 2

$$H(s) = \frac{k_f}{(1 + sT_1)(1 + sT_2)} \quad (3.221)$$

unde:  $k_f = \frac{\Delta \theta_{\max}}{4\sigma T_{\max}^3}$  - factorul de amplificare al cuptorului (câștigul cuptorului)

$\Delta \theta_{\max}$  - temperatura maximă în camera cuptorului;

$4\sigma T_{\max}^3 = P_{\max}$  - puterea de încălzire maximă.

a) Se aproximează funcția de răspuns cu o combinație de funcții exponențiale:

$$y(t) = k_f \beta \left[ 1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-\frac{t - \tau_m}{T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} e^{-\frac{t - \tau_m}{T_2}} \right] \quad (3.222)$$

Se aplică procedura de identificare prin regresie polinomială și cele mai mici pătrate, pentru 10 valori  $\theta_i$  achiziționate la momente de eșantionare  $t = t_0 + h\Delta t$  egale și se construiește matricea vector  $\Delta_i = \theta_{i+1} - \theta_i$  ( $i=1 \dots 9$ ).

- se rezolvă sistemul de ecuații:

$$s_2 \sum_{i=0}^{n-2} \Delta_i^2 + s_1 \sum_{i=0}^{n-2} \Delta_i \Delta_{i+1} + \sum_{i=0}^{n-2} \Delta_i \Delta_{i+2} = 0 \quad (3.223)$$

$$s_1 \sum_{i=0}^{n-2} \Delta_{i+1}^2 + s_2 \sum_{i=0}^{n-2} \Delta_i \Delta_{i+1} + \sum_{i=0}^{n-2} \Delta_i \Delta_{i+2} = 0$$

Notând:

$$e_1 = \sum_{i=0}^{n-2} \Delta_i^2; \quad e_2 = f_2 = \sum_{i=0}^{n-2} \Delta_i \Delta_{i+1}; \quad e_3 = \sum_{i=0}^{n-2} \Delta_i \Delta_{i+2}; \quad (3.224)$$

$$f_1 = \sum_{i=0}^{n-2} \Delta_{i+1}^2; \quad f_3 = \sum_{i=0}^{n-2} \Delta_{i+1} \Delta_{i+2}; \quad s_1 = \frac{e_1 f_3 - e_3 f_2}{e_2 f_2 - e_1 f_1}; \quad s_2 = \frac{e_3 f_1 - e_2 f_3}{e_2 f_2 - e_1 f_1}$$

Rezolvând ecuația de gradul 2:  $u^2 + us_1 + s_2 = 0$  (3.225)

se obțin soluțiile ce reprezintă valorile celor două constante de timp:

$$u_{1,2} = \frac{-s_1 \pm \sqrt{s_1^2 - 4s_2}}{2}; \quad T_1 = -\frac{h}{\ln u_1}; \quad T_2 = -\frac{h}{\ln u_2} \quad (3.226)$$

b) Se calculează *factorul de amortizare*:

$$\psi = \frac{T_1 + T_2}{2\sqrt{T_1 T_2}} \quad [1/s] \quad (3.227)$$

c) Se calculează *pulsatia naturală*:  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{T_1 \times T_2}}$  [rad/s] (3.228)

**Faza 2** Se discretizează funcția de transfer [112]:

$$H(z^{-1}) = \frac{(b_1 + b_2 z^{-1}) z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} \quad (3.229)$$

care duc la următoarele rezultate:

$$a_1 = e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}, \quad a_2 = e^{-\frac{t}{T_1}} e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (3.230)$$

$$b_1 = -A[-a_1] - B(e^{-\frac{T}{T_2}} + 1) - C(e^{-\frac{T}{T_1}} + 1), \quad b_2 = A a_2 + B e^{-\frac{T}{T_2}} + C e^{-\frac{T}{T_1}}$$

unde:

$$A = k_f, \quad B = \frac{k_f p_2}{p_1 - p_2}, \quad C = \frac{k_f p_1}{p_2 - p_1} \quad (3.231)$$

$$p_1 = \frac{1}{T_1}, \quad p_2 = \frac{1}{T_2} \quad (3.232)$$

**Faza 3** Se determină parametrii de manevră pe considerații de stabilitate privind amplasarea optimă a polilor și zerourilor

$$\rho = \psi \omega t \sqrt{\frac{1 - \psi^2}{\psi^2}}, \quad \varphi = e^{-\psi \omega t}, \quad A_b = 2 \rho \cos \varphi, \quad B_b = \rho^2 \quad (3.233)$$

**Faza 4** Se determină un predictor pentru timpul mort în următorii pași:

a) Se construiește funcția de transfer pentru sistem de ordinul 2 cu timp mort [112], conform relației (3.229).

b) Se calculează coeficienții [112]:

$$S_0 = 1$$

$$S_1 = -a_1$$

$$S_2 = -(a_2 S_0 + a_1 S_1) \quad (3.234)$$

$$S'_{d-1} = (S'_{d-2} a_1 + S_{d-1} a_1)$$

$$S'_d = 0$$

unde:

$$n_s = d' = d - 1 \quad (3.235)$$

$$r_0 = -(a_1 S'_{d-2} + a_1 S'_{d-1}) \quad , \quad r_1 = -(a_2 S_{d-1}) \quad (3.236)$$

c) Se calculează mărimea de ieșire a predictorului [112]

$$y(t+d') = f_0 u(t-1) + f_1 u(t-2) + \dots + f_{d-1} u(t-d) + \\ + f_d u(t-d) + r_0 y(t-1) + r_1 y(t-2) \quad (3.237)$$

**Faza 5** Se calculează un estimator de timp mort:

a) Se calculează *timpul mort echivalent* pentru funcția predictată

$$y(t+d') = y_p \quad (3.238)$$

Se calculează pentru  $i > 1$

$$y_{p(i,1)} = y_{p1} \quad (3.239)$$

Timpul mort:

$$T_{moei} = i - 2 \frac{y_{p1}}{y_{p(t,1)} - y_{p1}} \quad (3.240)$$

$$\text{Dacă:} \quad \tau_{nei} > \tau_{nei-1}, \quad (3.241)$$

se reactualizează *timpul mort*:

$$\tau_{nei} = \tau_{nei-1}, \quad (3.242)$$

și se mută punctul de inflexiune "i".

$$\text{Dacă:} \quad \tau_{ni} > \tau_{ni-1}, \quad (3.243)$$

se iese din estimare și timpul mort:

$$\tau_n = \tau_{ni-1} + 1 \quad (3.244)$$

b) Se procedează ca la faza 2 pentru a determina noile constante de timp ținând cont de timpul mort

$$a_{1e} = e^{-\frac{t}{T_{1e}}}$$

$$a_{2e} = e^{-\frac{t}{T_{1e}}} e^{-\frac{t}{T_{2e}}}$$

$$b_{1e} = -A[-a_{1e}] - B \left( e^{-\frac{t}{T_{2e}}} + 1 \right) - C \left( e^{-\frac{t}{T_{2e}}} + 1 \right)$$

$$b_{2e} = A a_2 + B e^{-\frac{t}{T_{2e}}} + C e^{-\frac{t}{T_{1e}}}$$

$$A = k f_c$$

$$B = \frac{k_{fc} P_{2e}}{P_{1e} - P_{2e}}$$

$$C = \frac{K_f P_{1e}}{P_{2e} - P_{1e}} \quad (3.245)$$

$$P_1 = \frac{1}{T_{1e}} \quad ; \quad P_2 = \frac{1}{T_{2e}}$$

**Faza 6** Se calculează în discret parametrii funcției de reglare, de proporționalitate ( $k_p$ ), de integrare ( $k_i$ ) și de derivare ( $k_d$ ):

$$k_i = \frac{(1 + a_{2e} + a_{1e})}{a_{1e} + 2 a_{2e}} \quad (3.246)$$

$$k_d = \frac{a_{2e}}{a_{1e} + 2 a_{2e}} \quad (3.247)$$

$$k_r = \frac{(1 + Ab + Bb)}{\frac{-1}{a_{1e} + 2a_{2e}} [b_{1e}(1 - B_b - 2Z - A_b Z)]} \quad (3.248)$$

unde:

$$\begin{aligned} Z = -1, \text{ dac\u0163 } \frac{b_{2e}}{b_{1e}} < -1 \\ Z = 0, \text{ dac\u0163 } \frac{b_{2e}}{b_{1e}} > 0 \end{aligned} \quad (3.249)$$

**Faza 7** Se calculează coeficienții regulatorului [112]:

$$p_{b0} = k_r (1 + k_i + k_d) p_{a1} \quad (3.250)$$

$$p_{b1} = k_r (1 + 2k_d) \quad (3.251)$$

$$p_{b2} = k_r k_d p_{a1} \quad (3.252)$$

$$p_{a1} = 1 - f \quad \text{\u0162i}$$

$$\text{unde: } f = \frac{B_b + A_b z + z}{1 - z} \quad (3.253)$$

**Faza 8** Comanda de ie\u0219ire din regulator

$$\Delta y = y_{ref} - y_p(i, 1) \quad (3.254)$$

$$\Delta e(t) = p_{b0} \Delta y + p_{b1} \Delta y_1 + p_{b2} \Delta y_2 - p_{a1} \Delta e(t-1) - p_{a2} \Delta e(t-2) \quad (3.255)$$

## **CAP. IV VALIDAREA PROGRAMELOR PRIN SIMULĂRI ȘI EXPERIMENTĂRI PE UN CUPTOR INDUSTRIAL**

### **IV.1 CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND OBIECTIVUL VALIDĂRII**

Obiectivul acestui capitol îl constituie verificarea algoritmilor de programare și corectitudinea realizării modelării numerice. În paralel cu elaborarea subprogramelor s-au întreprins mai multe cercetări aplicative în colaborare cu SC INDEPENDENȚA Sibiu, care a disponibilizat un cuptor din secția de tratamente termice al fabricii "Lanț cu role". Cuptorul a fost supus recent unui proces de modernizare constructivă prin înlocuirea sistemului de încălzire cu tuburi radiante cu sistem de încălzire prin rezistoare de tip tubular din țeavă refractară.

Pentru validarea experimentală a subprogramelor de modelare numerică a cuptorului și a instalației de încălzire s-au efectuat mai multe măsurători și determinări pe cuptorul gol, fără șarjă, efectuând măsurători și determinări energetice.

Determinarea pierderilor la mers în gol, a căldurii acumulate și a timpului de atingere a regimului termic staționar s-au realizat prin citirea contorului de energie activă urmată de analiză statistică a datelor înregistrate. Pentru prelucrarea datelor s-a utilizat un program specializat, denumit **PERFOCUP**. Acest program a fost realizat în exclusivitate pentru determinarea prin analiză statistică a performanțelor cuptoarelor electrice pe baza mărimilor achiziționate din cuptor și din instalația de alimentare cu energie electrică. Au fost efectuate probe atât în stare de funcționare normală cu atmosferă, cât și fără atmosferă, pentru a determina influența atmosferei asupra caracteristicii statice a cuptorului și asupra conductivității materialelor de izolare.

Întrucât probele s-au efectuat pe durata mai multor ore, au fost necesare corecții periodice asupra parametrilor mășurați care sunt influențați de variațiile semnificative ale temperaturii mediului ambiant.

Compoziția atmosferei din cuptor a fost determinată prin măsurarea conținutului de CO și CO<sub>2</sub>.

Rezultatele obținute prin măsurători pe cuptor au fost confruntate cu cele obținute prin simulare. Elementele de construcție ale modelului matematic a cuptorului și a instalației de încălzire au fost extrase din documentația de execuție.

Pentru validarea corectitudinii modelării numerice a șarjei au fost realizate un număr de trei experimente împreună cu validarea subprogramului de simulare a procesului de încălzire. Întrucât șarjele au fost constituite din repere specifice fabricației lanțului cu role, regimul de testare a fost supus unor restricții de natură tehnologică specifice acestor produse. Astfel, piesele au fost distribuite în vrac, în cantitate de 10 kg în fiecare coș, după cântărire, iar coșurile au fost amplasate pe suportii de șarjare pe unul sau două rânduri suprapuse, fiecare rând conținând patru coșuri. Reperele din care s-au constituit șarjele de probă sunt bușji și role de tip 1 1/4" și de tip SLP din fabricația lanțului cu role.

Pentru validarea subprogramului de simulare au fost efectuate un număr de trei experimentări cu șarjele supuse validării modelului numeric. Condițiile de experimentare au fost impuse de tehnologia de tratament. Astfel temperatura inițială a cuptorului, înaintea introducerii șarjei, este superioară cu 50°C față de temperatura de tratament (870-880 °C), din considerente de protecție la funcționarea cu atmosfere controlate, urmînd ca după efectuarea operației de șarjare referința regulatorului să fie reindexată la temperatura de tratament. Prin această probă s-a urmărit corectitudinea determinării prin simulare a timpilor de încălzire pe faze tehnologice, a distribuției în timp a câmpului de temperatură la suprafață și în centrul șarjei și evoluția puterii medii absorbite, iar ca rezultate implicite determinarea consumurilor de energie pe ciclul de tratament și pe unitatea de masă a șarjei brute.

Experimentul privind procesul de încălzire a impus o serie de probleme cărora s-a încercat să li se asigure o rezolvare corespunzătoare. Astfel pentru a înregistra fascicolul de curbe reprezentînd evoluțiile în timp a temperaturilor în diferite zone ale șarjei s-a impus amplasarea unui număr de 3-10 termocuple flexibile miniatură în șarjă. Joncțiunea caldă a fiecărui termocuplu a fost sudată pe câte o piesă pentru a diminua efectul radiației asupra valorii măsurate a temperaturii. Deoarece ciclul tehnologic impune șarjarea la cald, operația de introducere a necesitat un timp mai lung de deschidere a ușii cuptorului (10 min.) decât este necesar în mod normal (1-2 min.). Această întârziere a fost cauzată de precauțiile impuse pentru menținerea amplasării și integrității termocuplelor. Poziționarea optimă a termocuplului din dotarea cuptorului în raport cu șarja s-a realizat în timpul derulării procesului de încălzire dat fiind importanța deosebită pe care o are această amplasare pentru asigurarea unui ciclul de tratament corect. O problemă mai delicată care a necesitat o rezolvare, pe parcursul eperimentărilor, a fost înregistrarea măsurii curentului absorbit pe durata perioadei de conducție comandată prin tiristoare.

Rezultatele obținute prin simulare au fost confruntate cu cele obținute prin măsurători pentru a verifica în primul rând corectitudinea algoritmului de simulare dar și corectitudinea modelului de șarjă adoptat.

De la început au trebuit acceptate unele neajunsuri care pot influența datele provenite din simulare și anume: al influenței perturbațiilor provocate din variațiile aleatorii ale tensiunii de alimentare cu energie electrică (între 360 V până la 440 V ), al necunoașterii compoziției reale a materialului din care este confecționat reperul, precum și compoziția și caracteristicile de material la zi ale dispozitivelor și suportilor de șarjă, care constituie peste 70% din masa șarjei brute și care din cauza procesărilor repetate își modifică structura inițială.

Pentru a testa algoritmul de reglare autoadaptiv și procedura de identificare a parametrilor funcției de reglare s-a procedat la un experiment separat utilizînd o configurație de hard constituită dintr-un calculator IBM PC și un *controler de proces*, preferat echipării structurilor de hard pentru conducerea numerică a proceselor complexe. Testele au urmărit modul în care procedura de identificare asigură determinarea cu precizie a constantelor de timp ale procesului, precum și algoritmul de autoacordare adaptivă ca răspuns al unor *perturbații provocate artificial*. Testările au fost realizate în cadrul unui proces de încălzire a cuptorului gol pornind de la temperatura mediului ambiant până la temperatura maximă de utilizare (950 °C).



În subprogramul de simulare a încălzirii șarjei s-a utilizat doar acea parte a procedurii care asigură identificarea și acordarea parametrilor funcției de reglare precum și comanda optim graduală a puterii injectate în sistemul rezistiv de încălzire a cuptorului modelat.

Pentru a testa algoritmul de procesare termochimică de carburare a fost utilizată o configurație de hard care a inclus un calculator echipat cu un program de simulare a comportării procesului în cuptorul real și un alt calculator pe care s-a rulat programul de simulare.

#### IV.2 DESCRIEREA CONSTRUCTIV-FUNCȚIONALĂ A CUPTORULUI

În Fig.4.1 este reprezentat un desen de ansamblu care evidențiază principalele părți componente ale cuptorului.

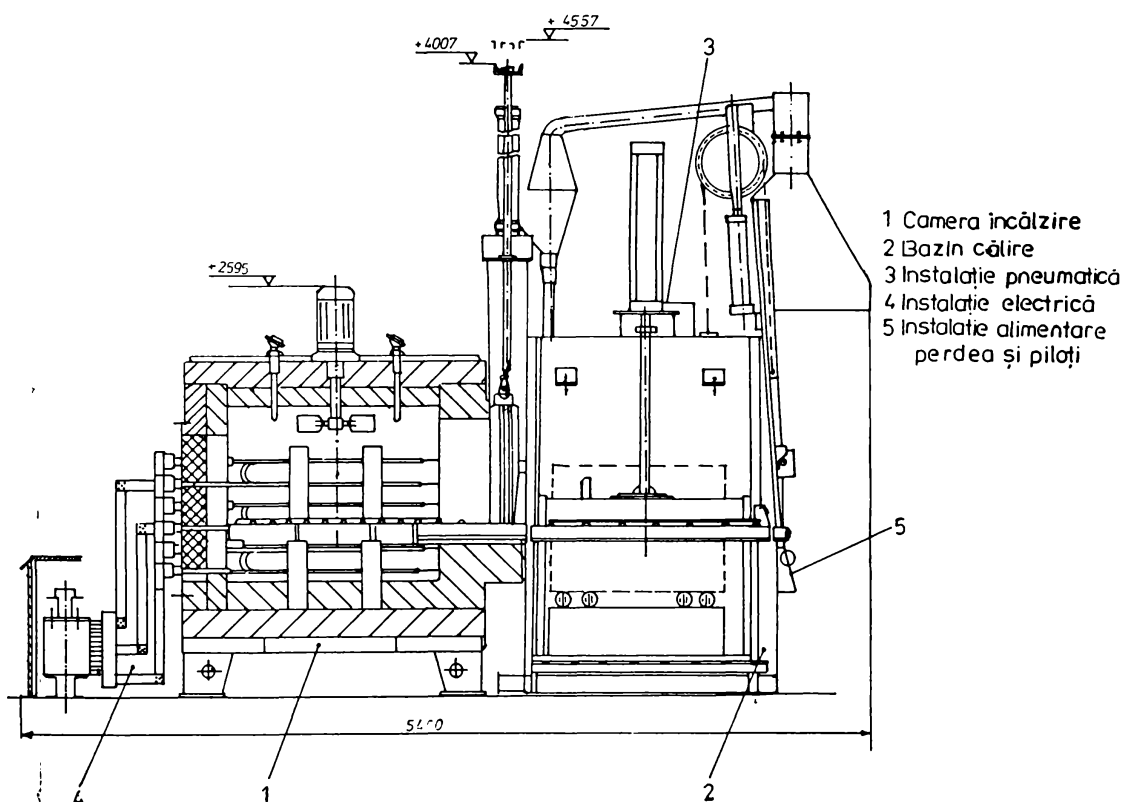


Fig.4.1 Cuptorul industrial pentru testări și determinări experimentale.

Cuptorul este de tip cameră, cu vatră fixă ce permite operații de șarjare deșarjare pe orizontală prin mijloace de mecanizare parțial din exteriorul cuptorului și parțial din interiorul lui. El are în componență o *antecameră* neîncălzită ce asigură separarea mediului din cuptorul, umplut cu atmosfera, față de mediul din exteriorul cuptorului și sub care este amplasat bazinul cu ulei.

Transportul șarjei în și de la mediul de călire se realizează prin intermediul unui lift care comunică cu antecamera.

Cuptorul este încălzit electric prin rezistoare metalice, din material refractar, sub formă de țevă. Modul de amplasare a rezistoarelor a fost modific-

at pe durata probelor din montajul pe orizontală în montajul pe verticală din necesitatea eliminării contactului dintre elementul rezistiv și suportii din cărămidă. S-a constatat că acești suportii se acoperă în timp cu funingine fapt ce poate conduce la scurtcircuite sau supraîncălziri locale ale rezistoarelor.

Instalația electrică de alimentare a sistemului de încălzire (Fig.4.2) include un contactor, echipamentul de modulare a puterii electrice injectate în rezistoare și un transformator coborâtor de tensiune cu alimentare trifazată și ieșire bifazată, de tip Scott. Comanda reglării temperaturii se efectuează prin regulator de temperatură continuu cu comportare PID. Parametrii regulatorului se pot acorda manual prin potențioetre.

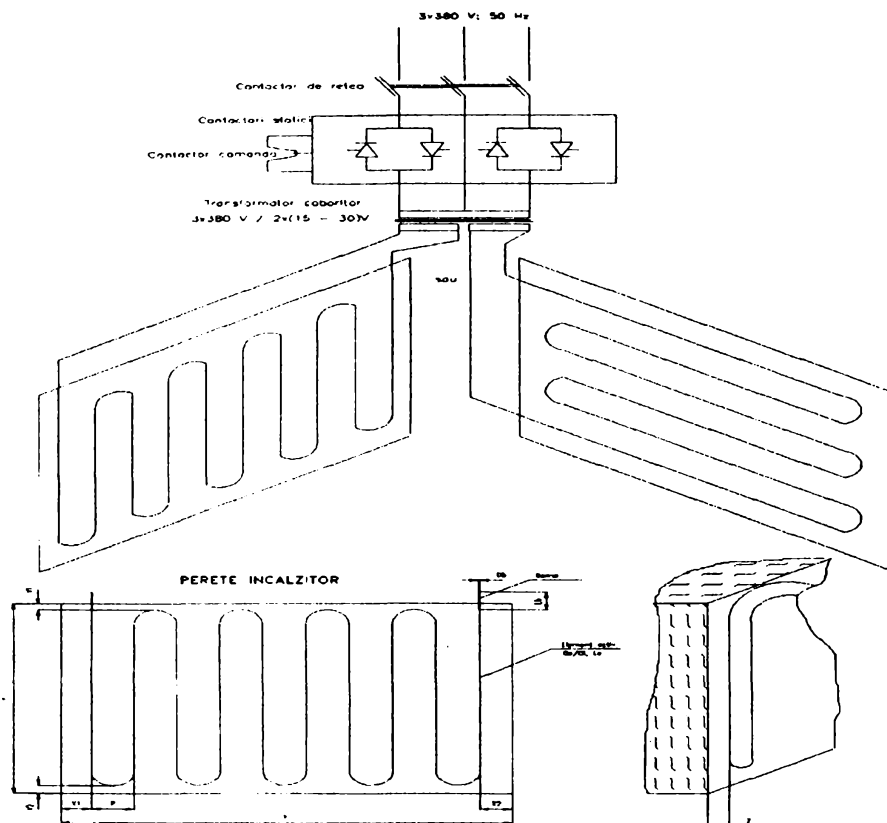


Fig.4.2 Alimentarea cu energie electrică a pereților încălzitori

Cuptorul este din categoria celor cu funcționalități multiple. În el pot fi realizate tratamente termice până la 1000 °C, în mediu de aer sau în atmosfere protectoare. În acest scop el este echipat cu un *agitator*, cu acționare electrică, cu rolul de a asigura recircularea și uniformizarea atmosferei în camera cuptorului.

Cuptorul este supus unui regim de exploatare continuu fiind întrerupt odată sau de două ori pe lună sau accidental când se ivesc defecțiuni ce nu pot

fi remediate în starea caldă.

Sub aspectul modului în care se realizează operațiile de șarjare-deșarjare regimul de funcționare este discontinuu.

În context cu conținutul lucrării și al testelor realizate pentru validarea experimentală sunt prezentate în Tab.4.1 caracteristicile constructive și de material pentru o parte reprezentativă din gama de repere specifice fabricației lanțului cu role.

Tabel 4.1

Reper	Dimensiuni de gabarit [mm]			Volum[mm <sup>3</sup> 10 <sup>-3</sup> ]		Masă [g]	Suprf [mm <sup>2</sup> ]	Marca oțel
	D <sub>e</sub>	D <sub>i</sub>	L	Piesă	Metal			
Rola SLP	16	11,3	21,1	4,24	1,89	14,89	1676	15C <sub>r</sub> 9
Bucșă SLP	11,9	9,07	29,3	3,25	1,75	13,85	2023	15C <sub>r</sub> 9
Bucșă 1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> "	13,8	9,62	27,1	4,05	2,08	16,4	1177	21M <sub>n</sub> C <sub>r</sub> 25

În Tab.4.2 sunt prezentate date privind modul de distribuție și de configurare a reperelor tehnologice menționate anterior.

Tabel 4.2

Tip model	Reper	Mod de configurare				Coef. umplere cu metal	Coef. umplere cu piese
		Nr.coșuri	Nr.suport	Piese in coș	Masă piese in coș		
Plăci Cuve	Rola SLP	4	2	672	10	0,086	0,265
Plăci Cuve	Bucșă SLP	2	2	2650	10	0,096	0,27
Plăci Cuve	Bucșă 1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub> "	4	2	975	10	0,086	0,293

### IV.3 SIMULAREA ȘI VALIDAREA PRIN MĂSURĂTORI EXPERIMENTALE A PERFORMANTELOR TERMICE ALE CUPTORULUI

#### IV.3.1 Date constructive utilizate în generarea modelului de cuptor

Principala caracteristică constructivă a cuptoarelor este volumul util destinat amplasării șarjei nominale. Dimensiunile spațiului util ale modelului de cuptor ale sunt: lățimea L<sub>q</sub>=600 mm, adâncimea A<sub>q</sub>=1200 mm și înălțimea H<sub>q</sub>=400 mm. Dimensiunile interioare ale cuptorului necesare amplasării și distribuției elementelor rezistoare pentru încălzire sunt următoarele: lățimea L<sub>c</sub>=1310 mm, adâncimea A<sub>c</sub>=1580 mm și înălțimea H<sub>c</sub>=890 mm (Fig.4.3).

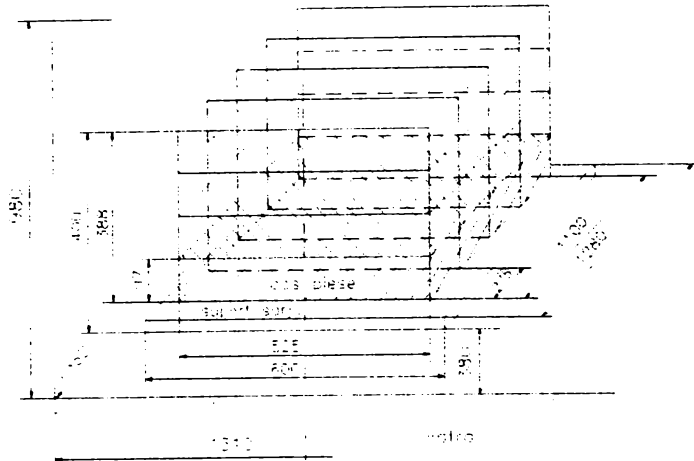


Fig.4.3 Modul de configurare a șarjei în cuptor

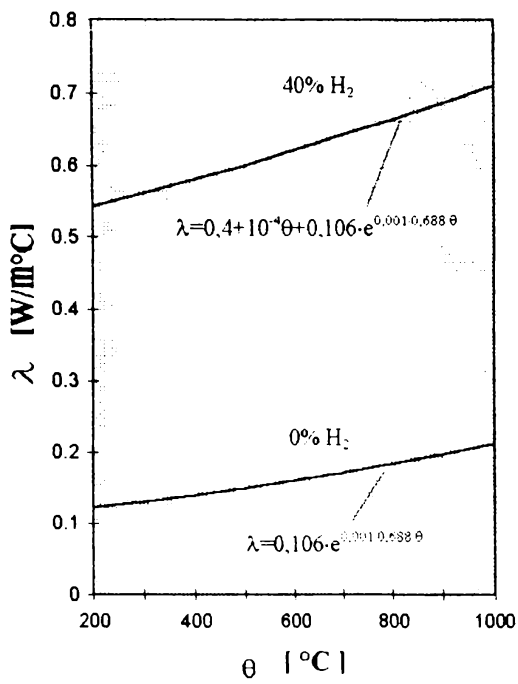
## 1\*) Structura izolației cuptorului

În Tab.4.3 sunt specificate, pentru fiecare tip de perete, elementele dimensionale și de material pentru fiecare strat din componența acestuia.

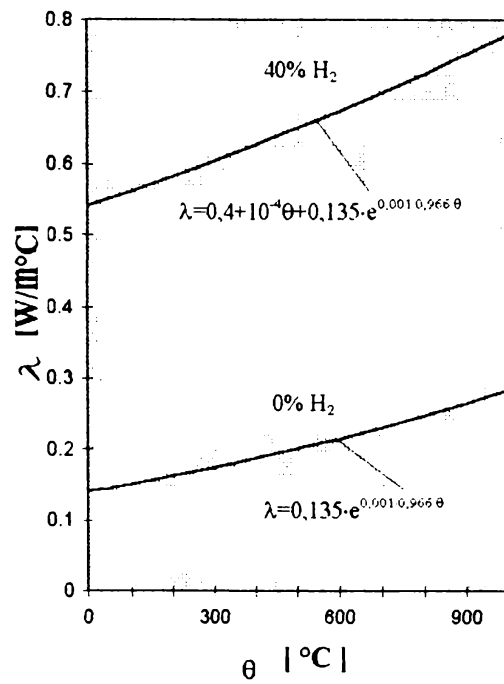
Tabel 4.3

Tip perete	Nr.strat	Marca material	Caracteristici			Grosime strat [mm]
			$\gamma$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	$\lambda_0$	$k_0 \cdot 10^{-3}$	
Pereți laterali și perete din spate	1	CaramidaJM26	500	0,106	0,688	124
	2	CaramidaJM23	500	0,135	0,966	352
	3	Vată minerală	120	0,035	3,111	60
Bolta cuptor	1	CaramidaJM26	500	0,106	0,688	124
	2	CaramidaJM23	500	0,135	0,966	352
	3	Vată minerală	120	0,035	3,111	60
Vatră cuptor	1	CaramidaJM26	500	0,106	0,688	195
	2	Diatomită	600	0,141	0,696	195
Ușa cuptor	1	CaramidaJM26	500	0,106	0,688	125
	2	Vată minerală	120	0,035	3,111	70

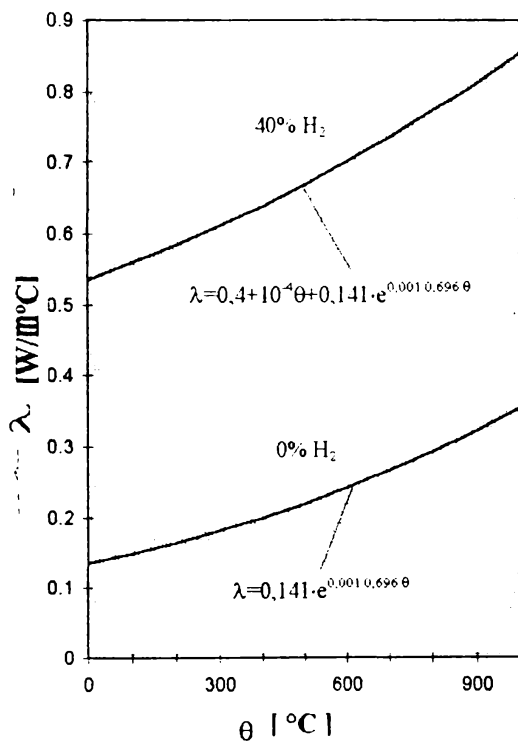
În Fig.4.4 sunt reprezentate grafic curbele de variație a conductivităților termice ale materialelor din structura de izolare a cuptorului în funcție de temperatură și de conținutul de H<sub>2</sub> din atmosfera de tratament din incinta cuptorului. Curbele au fost ridicate pe baza relațiilor formulate în Cap.II (ec.2.42 și 2.44).



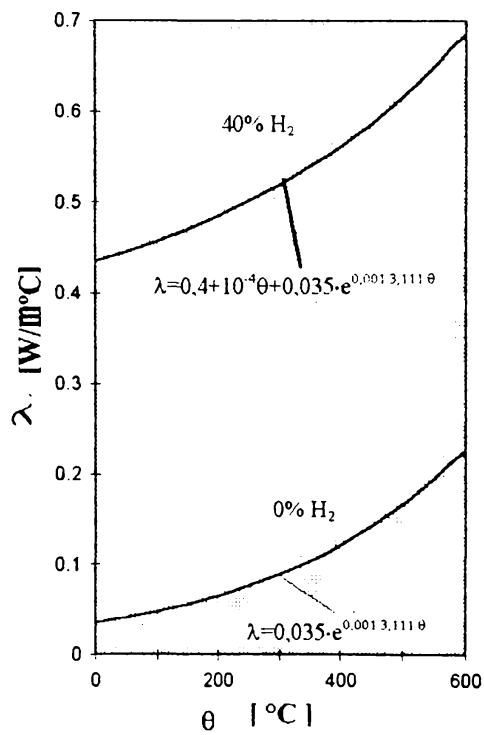
Căramidă ușoară pentru atmosferă controlată JM26 500kg/m³



Diatomită 600kg/m³



Căramidă ușoară JM23 500kg/m³



Vată minerală 110kg/m³

Fig.4.4 Variația conductivităților termice prin materiale de izolare funcție de temperatură și de conținutul de hidrogen din atmosferă.

## 2\*) Caracteristici constructive ale instalației de încălzire prin rezistoare

În Tab.4.4 sunt specificate principalele elemente constructive, de configurare și caracteristici de material pentru elementele de încălzire din dotarea cuptorului.

Tabel 4.4

Tip material:	Oțel refractar W 4864
Diametrul exterior/interior rezist:	45/37 mm
Diametru/lungime bornă:	45/660mm
Lungime activă element rezistor:	5,735m
Lungime totală element rezistor:	5,936 m
Tensiune pe element:	15V/50Hz
Rezistența electrică pe element la 20 ° C:	0,01153 Ohm
Număr elemente pe cuptor:	6 buc.
Număr total borne:	12 buc.

## 3\*) Elemente constructive particulare

În Tab.4.5 sunt evidențiate o serie de elemente constructive și funcționale ce trebuiesc luate în considerare la testarea prin simulare și prin măsurători experimentale.

Tabel 4.5

Materiale metalice în interiorul cuptorului:	400 Kg
Materiale ceramice în interiorul cuptorului:	480 Kg
Diametru ax rotor agitator (1 buc ):	60 mm
Diametru termocuple (2 buc):	22 mm
Debit gaz endo:	10 Nm <sup>3</sup> /h
Timp deschidere ușa:	1 min

## IV.3.2 Rezultatele testării cuptorului prin simulare și prin măsurători experimentale.

## 1\*) Testarea prin simulare a performanțelor termice nominale ale cuptorului gol, fără șarjă

Pentru testarea prin simulare a performanțelor termice ale cuptorului și pentru validarea lor prin măsurători experimentale s-a convenit ca temperatura de testare să fie 950°C, respectiv temperatura maxim admisibilă pentru funcționarea în regim de durată a cuptorului. Determinarea performanțelor termice ale cuptorului au fost realizate pentru funcționarea în gol fără sarcină urmărindu-se obținerea datelor enunțate în Cap.III,prgf.III.3.1, în care au fost specificate funcțiile subprogramului MOD\_CUP.

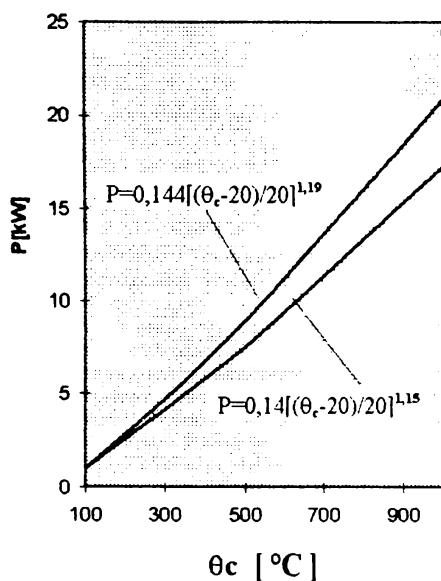


Fig.4.5 Variația pierderilor cu temperatura

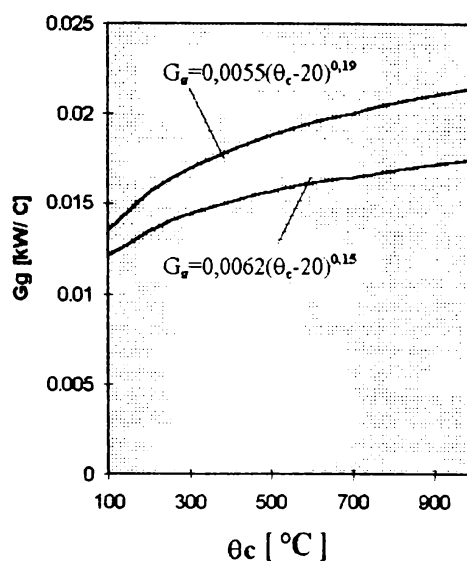


Fig.4.6 Variația conductanței cu temperatur

În Fig.4.5 este reprezentată curba determinată pentru variația pierderilor cuptorului, sub forma unei funcții de tip exponențial, în domeniul nominal al temperaturii de utilizare și în condițiile de funcționare fără sau cu atmosferă de tratament cu conținut de peste 40%  $H_2$ .

Utilizând această funcție a caracteristicii statice în corelare cu funcția care răcirii naturale a cuptorului se pot obține soluții de optimizare a consumului de energie și a costurilor cu energia pentru situații de întrerupere temporară a alimentării cu șarjă de tratat și necesitatea de a trece cuptorul într-un regim cât mai economic de așteptare.

În Fig.4.6 este reprezentată variația conductanței termice globale a cuptorului, definită ca raportul între pierderile cuptorului și diferența de temperatură între cea din interiorul și cea de la exteriorul cuptorului. Această funcție se utilizează în procesul de simulare a încălzirii șarjei. Ea ține cont de mărimea totală a pierderilor cuptorului raportate la suprafața de schimb termic și nu numai de cele generate prin conducția termică a pereților. În

În Fig.4.7 este reprezentată variația în timp a consumului de energie prin acumulări, raportat la unitatea de suprafață a fiecărui perete de cuptor, până la atingerea regimului termic staționar. Semnificativ este că nu toți pereții cuptorului ating regimul staționar după aceeași durată de timp și ca urmare timpul real de atingere a regimului staționar pentru întreg cuptorul este cel dictat de structura de izolație cu timpul cel mai mare de acumulări (în cazul general aceasta este vatra cuptorului a cărei structură este "întărită" din considerente de rezistență mecanică).

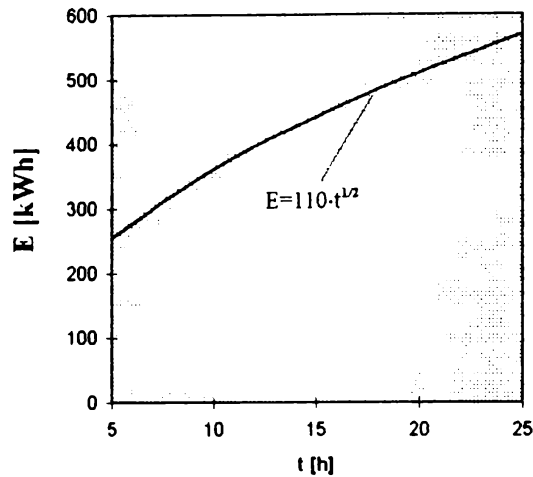


Fig.4.7 Variatia consumului de energie pe durata punerii in regim stationar

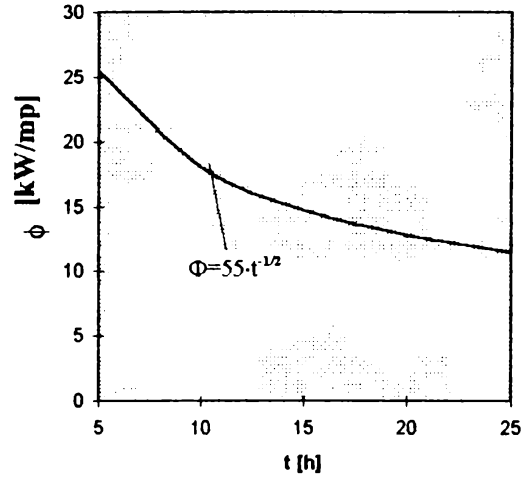


Fig.4.8 Variatia fluxului termic prin pereți

În interesul utilizatorilor de cuptoare de tratament deosebit de util, pentru optimizarea consumului de energie, legat direct de durata ciclului, este cunoașterea evoluției crescătoare în timp a consumului de energie datorat conducerii termice a pereților izolatori.

În Fig.4.8 este reprezentat modul de variație în timp a pierderilor prin conducția peretelui.

În Tab.4.6 sunt specificate principalele date obținute prin simulare subprogramului MOD\_CUP pentru evidențierea principalelor elemente de construcție a unei structuri de bilanț termic.

Tabel 4.6

Pierderile termice prin conducția pereților:	11,57kW
Pierderi suplimentare (traversări, etanșări, atmosferă):	9,97kW
Pierderi totale la temperatura de 950 °C:	cu atmosferă 19,33kW fără atmosferă 16,49kW
Energia termică acumulată în izolație la stabilizare:	664,5kWh
Energia termică acumulată suplimentar în construcția interioară:	484,4kWh
Inerția termică a cuptorului:	0,711kWh/°C
Variația pierderilor totale cu temperatura:	$P(\Delta\theta) = 0,14357 * [\Delta(\theta)/\theta_a]^{1,19}$ kW -cu atmosferă $P(\Delta\theta) = 0,14003 * [\Delta(\theta)/\theta_a]^{1,15}$ kW -fără atmosferă
Variația conductanței termice globale cu temperatura:	$C_g = 0,0059 * [\Delta(\theta)]^{0,19}$ kW/°C -cu atm. $C_g = 0,0062 * [\Delta(\theta)]^{0,15}$ kW/°C -fără atm.



## 2°) Testarea prin simulare a performanțelor nominale ale instalației de încălzire

În urma generării modelului de perete încălzitor a fost posibil de determinat prin subprogramul **CALC\_REZ** parametrii nominali ai instalației de încălzire funcție de datele constructive, de material și de modul de configurare geometrică a elementelor rezistive în raport cu peretele cuptorului pe care sunt amplasate.

În **Tab. 4.7** sunt prezentate principalele date rezultate pentru modelul de instalației de încălzire adoptat.

**Tabel 4.7**

Puterea electrică nominală a instalației de încălzire:	79,2 kW
Intensitatea curentului nominal prin rezistor:	949 A
Încărcarea specifică a rezistorului:	1,655 W/cm <sup>2</sup>
Densitatea de putere a peretelui încălzitor:	17 kW/m <sup>2</sup>
Densitatea de curent prin rezistor:	1,84 A/mm <sup>2</sup>
Factor de vedere geometric:	$F_{R-P}=0,4494$ ; $F_{R-R}=0,0516$
Căștigul static al cuptorului:	11,67 °C/kW
Factor de amplificare cuptor:	0,086kW/°C
Banda de proporționalitate:	11,67 %
Funcția de variație a rezistenței cu temperatura:	$R_{e1}=0,01244[1+(\theta_c -20)*0,0002]$ Ω/°C
Variația temperaturii rezistorului cu temperatura din cuptor:	$\theta_p = \sqrt{\sqrt{(7395,5+T^{C4})}-273}$ °C

În **Fig 4.9** este reprezentată curba de variație a temperaturii rezistorului funcție de temperatura din cuptor, iar în **Fig.4.10** este reprezentată curba de variație a fluxului termic disipat prin radiație de la suprafața peretelui încălzitor funcție de temperatura șarjei.

Analiza acestor curbe evidențiază elementele ce pot fi valorificate în scopul optimizării ciclurilor de încălzire a șarjei prin scurtarea timpului de încălzire și creșterea productivității cuptorului. Atunci când șarja este încă rece mărimea fluxului termic disipat este funcție de temperatura rezistorului și este cu atât mai mare cu cât această temperatură poate fi ridicată cât mai sus. Singura restricție pentru această perioadă a ciclului de încălzire este temperatura maxim admisibilă a materialului din care a fost confecționat rezistorul. Acest avantaj impune însă un control precis asupra temperaturii rezistorului și un alt mod de realizare a reglajului temperaturii (după temperatura șarjei).

O cauză importantă a majorării pierderilor cuptorului îl reprezintă scurgerile de căldură prin borne. Aceste pierderi suplimentare se datoresc în atât degajărilor termice ca rezultat al efectului Joule prin traversarea bornei de către curentul electric, cu o intensitate destul de importantă (900-1200 A), cât și fluxului termic care se scurge dinspre interior spre exteriorul cuptorului.

În **Fig.4.11** și **Fig.4.12** sunt reprezentate curbele de variație în timp a pierderilor prin deschiderea ușii cuptorului, respectiv a coeficientului de schimb termic prin convecție la peretele exterior cu temperatura mediului ambiant.

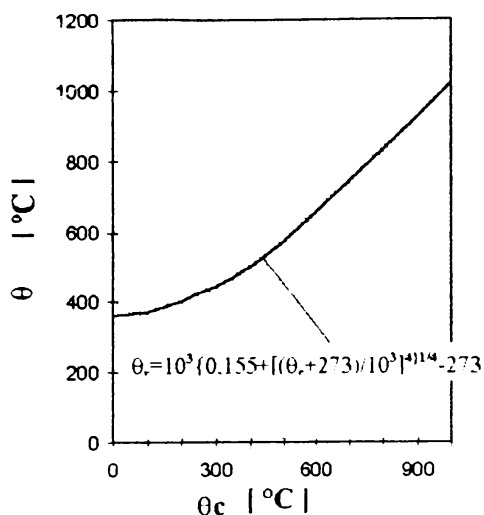


Fig.4.9 Variația temperaturii rezistorului funcție de temperatura din cuptor

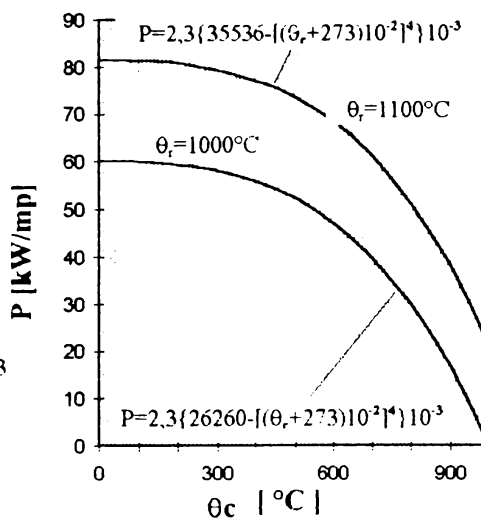


Fig.4.10 Variația puterii disipate funcție de temperatura din cuptor

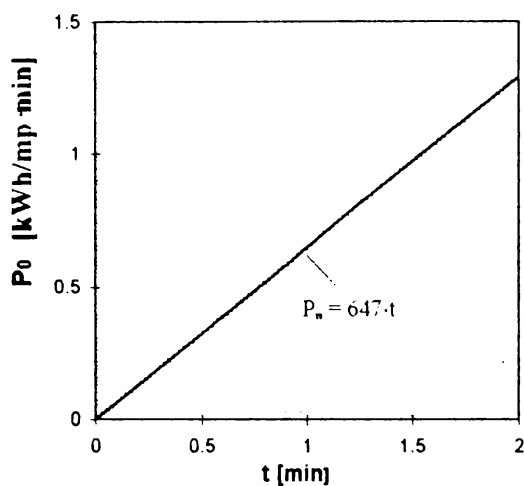


Fig.4.11 Variația fluxului prin radiație la exterior prin ușa deschisă

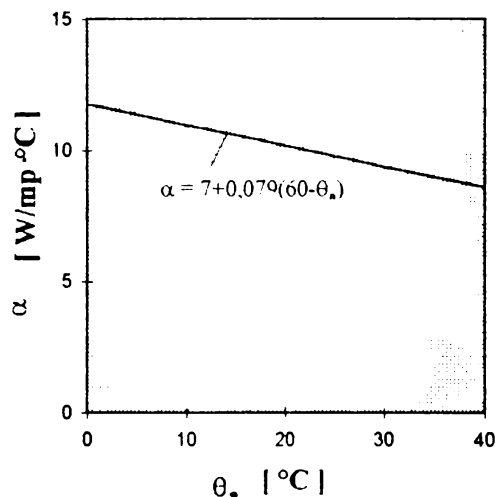


Fig.4.12 Variația coeficientului de convecție la exterior, funcție de temperatura mediului ambiant

#### IV.3.3 Comparații între mărimile determinate prin simulare cu cele determinate prin măsurători.

În reprezentarea grafică din Fig.4.13 sunt date principalele mărimi ce caracterizează performanțele termice ale cuptorului experimental. În aceste diagrame sunt specificate pentru comparație mărimile determinate prin simulare și cele determinate prin măsurători experimentale.

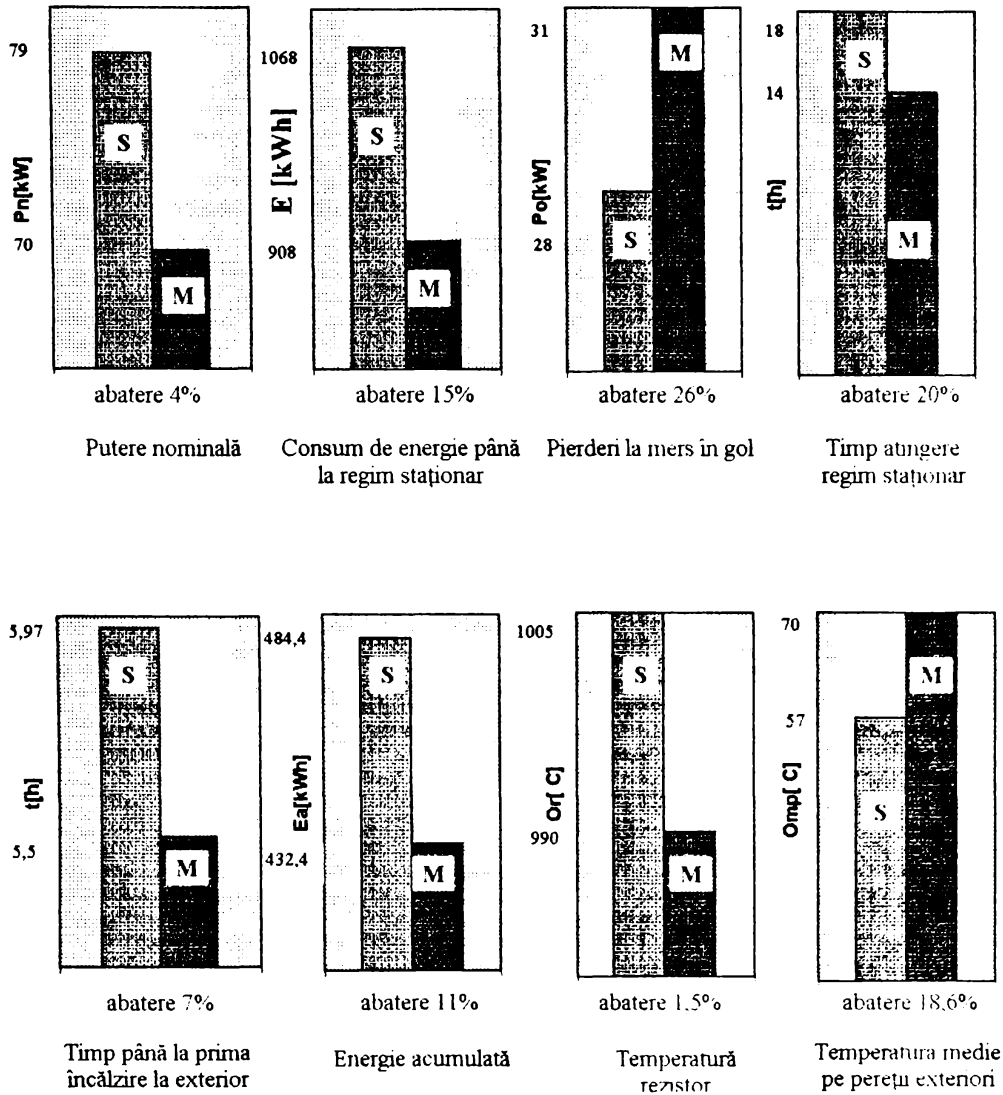


Fig.4.13 Comparație între mărimi obținute prin simulare (S) și prin măsurători (M)

Comparând aceste mărimi se remarcă următoarele observații și se pot formula unele comentarii:

a) *Puterea nominală pentru încălzire* obținută prin măsurători este mai mică decât cea obținută prin simulare cu o abatere de 10%. Aceasta abatere se încadrează în domeniul admisibil de toleranță și se poate justifica prin variația tensiunii de alimentare, de la valoarea nominală de 380V prevăzută în documentație, mărimii tensiunii la bornele de alimentare a rezistorului obținută prin transformator( 15 V în secundar pentru 380 V în primar), rezistențelor reale a

materialului rezistoarelor, care poate fi diferită de cea extrasă din catalogul furnizorului sau a suferit modificări în timp prin funcționare;

b) *Pierderile la mers în gol* obținute prin simulare sunt mai mari decât cele obținute prin măsurători cu **15%**. Această abatere se datorește tehnicii de determinare a pierderilor la mers în gol și de determinare a momentului de timp corespunzător atingerii regimului termic staționar, tehnica bazată pe citirea contorului la intervale de timp de **15 min.**. Această citire introduce erori de natură subiectivă de citire a timpului și a energiei înregistrate, precum și erori de hazard prin citirea contorului la intervale de timp când alimentarea cu energie electrică a rezistoarelor este întreruptă, ceea ce conduce la declararea stabilizării procesului înainte de termenul real;

c) *Timpul mediu de atingere a regimului termic staționar* se determină în testele experimentale pe baza stabilizării consumului prin pierderi. Eroarea de determinare prin măsurători a acestui timp este cu **20%** mai mare decât cea obținută prin simulare și are aceleași motivații ca în cazul determinării pierderilor la mers în gol;

d) *Consumul total de energie până la stabilizare*, obținut prin măsurători, este mai mare cu **26%** mai mare decât cel obținut prin simulări fapt care denotă că parametrii termofizici ai materialelor de înzidire sunt diferite în realitate față de cei specificați în cataloagele producătorilor și pe de altă parte că starea de uzură fizică a materialelor poate fi destul de avansată;

e) *Timpul mediu până la prima încălzire la exteriorul pereților* determinat prin măsurători este mai mic cu **7%** decât cel obținut prin simulări, fapt care se explică prin neconcordanța caracteristicilor termoizolatoare a materialelor de pe cuptor cu cele extrase din fișiere, care sunt date de catalog;

f) *Energia acumulată* obținută prin determinări experimentale este cu **11%** mai mică decât cea obținută prin simulare. Aceasta își are explicația prin metoda de determinare indirectă, în cazul măsurătorilor, prin calcule pe baza pierderilor la mers în gol, preluând erorile în determinarea acestora;

g) *Temperatura rezistorului* măsurată nu diferă semnificativ de cea obținută prin simulare (**1,5%**) și poate fi explicată doar prin precizia de măsurare a termocuplului și a tehnicii de măsurare prin detecția temperaturii doar la suprafața rezistorului;

h) *Temperatura medie pe pereții exteriori* ai cuptorului obținute prin măsurători este mai mare cu **18,5%** decât cea obținută prin simulare și se explică prin starea de uzură a materialelor din structura de izolare termică a pereților cuptorului.

#### IV.4 SIMULAREA ÎNCĂLZIRII ȘARJEI ȘI VALIDAREA PRIN PROBE ȘI MĂSURĂTORI EXPERIMENTALE

Obiectivul principal al lucrării îl reprezintă optimizarea regimurilor de funcționare în exploatare a cuptoarelor electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare. Din acest motiv procesul de simulare constituie sursa principală în determinarea cu anticipare a unui regim posibil de procesare ulterioară și care să asigure optimul, atât sub aspectul productivității, al consumului minim de energie cât și al unei calități superioare, garantate și reproductibile pentru produsele tratate. Elementele legate de condițiile impuse procesului de simulare a încălzirii șarjei sunt evidențiate în paragraful următor.

#### IV.4.1 Tipurile de șarjă model testate

Generarea modelului termic de șarjă s-a realizat prin rularea subprogramului **MOD\_ȘARJĂ**. Datele pe baza cărora s-a generat modelul de șarjă sunt datele referitoare la șarja reală brută specificate prin datele referitoare la componență și mod de configurare, completate cu datele despre caracteristicile geometrice și de material ale reperului tehnologic, ale suporturilor de șarjă și ale dispozitivelor, extrase din fișiere.

Pot fi generate 380 de modele de șarjă pentru 15 reperi tehnologici distincte și pentru 32 variante de configurare în cuptor. Elementele introduse ca dată de intrare, la generarea modelului termic de șarjă, sunt: numărul suporturilor de șarjă (1-2), numărul coșurilor amplasate pe suport pe un rând (2), numărul de rânduri suprapuse (1-4) și masa netă, determinată prin cântărire, a pieselor distribuite într-un coș. În context cu probele experimentale efectuate vor fi prezentate modele de șarjă sub formă de *cuve concentrice* și *plăci dreptunghiulare paralele*, pentru tipurile de șarjă brută reale, supuse testărilor.

Elementele comune pentru două tipuri de șarjă reală, constituite din reperatele *rolă SLP* și *bucșă 1 1/4*, sunt: număr suporturi 2, număr coșuri pe rând 2, număr rânduri suprapuse 2, masa șarjei nete 80 Kg, masa brută 420 Kg, dimensiunile de gabarit (lățime  $L_m=600$  mm, adâncime  $A_m=1200$  mm și înălțime  $H_m=260$  mm). Elementele pentru șarja reală constituită din reperul *bucșă SLP*: număr suporturi 2, număr coșuri pe rând 2, număr rânduri 1, masa șarjei nete 40 Kg, masa brută 380 Kg, dimensiunile de gabarit (lățime  $L_m=600$  mm, adâncime  $A_m=1200$  mm și înălțime  $H_m=160$  mm).

În Fig.4.14 sunt prezentate două modele de șarjă brută tratate prin simulare și care prezintă caracteristicile de constituire și configurare din Tab.4.8

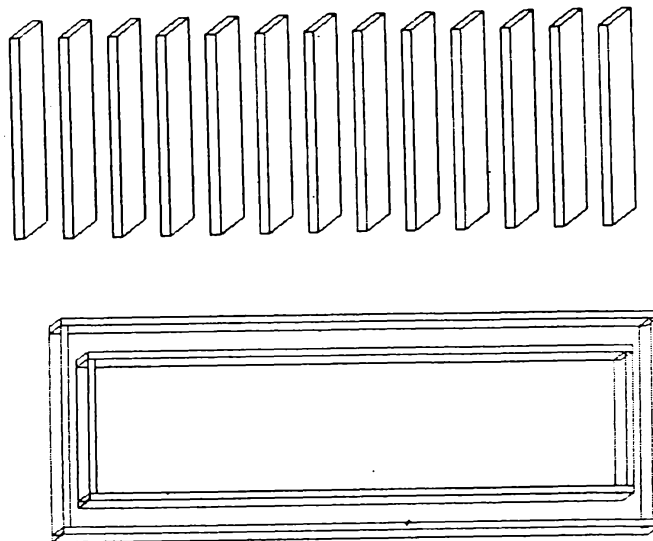


Fig.4.14 Modele de șarje tratate prin simulare  
a) model în plăci paralele; b) model în cuve concentrice.

Tabel 4.8

Parametrii model de șarjă pentru reper bucsă 1 1/4"	Tip model	
	în plăci paralele	în cuve concentrice
Număr elemente	21	5
Grosime element	5,42 mm	3,59 mm
Distanța între două elemente	24,31 mm	11 mm
Modul BIOT pentru element model	0,013	0,0182

#### IV.4.2 Rezultatele testării prin simulări și prin măsurători experimentale pentru procesarea termică a șarjei.

##### 1') Condiții de simulare

Prin subprogramul de simulare a procesului de încălzire *SIMUL TERM* se realizează până la 16 variante de simulări corespunzător diferitelor regimuri de procesare tehnologice de tratament termic: cu *reglare după temperatura șarjei* sau *după temperatura măsurată la termocuplul* cuptorului, cu sau fără timp de menținere la palierul temperaturi de referință, precum și cu sau fără subrăcire naturală la o temperatură inferioară.

Simularea procesului de încălzire după temperatura șarjei constituie o opțiune de optimizare a ciclurilor de tratament. Pentru transpunerea în practică sunt necesare tehnici de procesare prin conducere numerică utilizând echipamente inteligente sau prin controlere programabile capabile să memoreze diagramele generate cu anticipare prin simulare.

*Condițiile de simulare a procesului de încălzire pe șarje model* sunt cele ale unui regim normal de procesare tehnologică. Astfel:

- șarja model ocupă același volum și aceeași poziție, în raport cu vatra, pereții cuptorului și termocuplul, ca și șarja reală;

- cuptorul este adus inițial în regim termic staționar și menținut la temperatura de 950 °C. După efectuarea operației de șarjare referința cuptorului este redusă la temperatura de tratament 880 °C, iar abaterile admisibile tehnologic de ±10°C. Pe durata operației de șarjare-deșarjare ușa cuptorului este deschisă 2 min. iar alimentarea cu energie electrică a instalației de încălzire este întreruptă;

- timpul de staționare a șarjei în cuptor se prelungeste cu un timp de menținere la palier de 0,5-1 oră, după uniformizarea în temperatură a șarjei în domeniul abaterilor prescrise între temperatura finală la suprafața și în centrul șarjei. Acest timp de menținere este impus de realizarea unor transformări termofizice sau termochimice în șarjă;

- în conformitate cu tehnologia obișnuită de procesare termochimică după realizarea ciclului de încălzire și menținere la palier urmează o fază tehnologică de răcire a șarjei în același mediu protector al atmosferei ceea ce impune o subrăcire a întregului ansamblu cuptor-șarjă, prin pierderile cuptorului, la o temperatură de 820°C (o condiție de călire în ulei);

- regimul de reglare a puterii se realizează după temperatura măsurată la

termocuplul din dotarea cuptorului (tip Cr-Al). Precizia informației asupra temperaturii măsurate este influențată printre altele și de poziționarea acestuia în raport cu șarja și cu pereții cuptorului;

- regimul de dozare al puterii se realizează în conformitate cu principiul modulării prin comandă cu tren de undă cu raport fix între timpul de conducție și timpul de ciclu (1/2), conform caracteristicii funcționale ale contactorului static din dotarea instalației de automatizare a cuptorului (tip CSTA executat de IPRS).

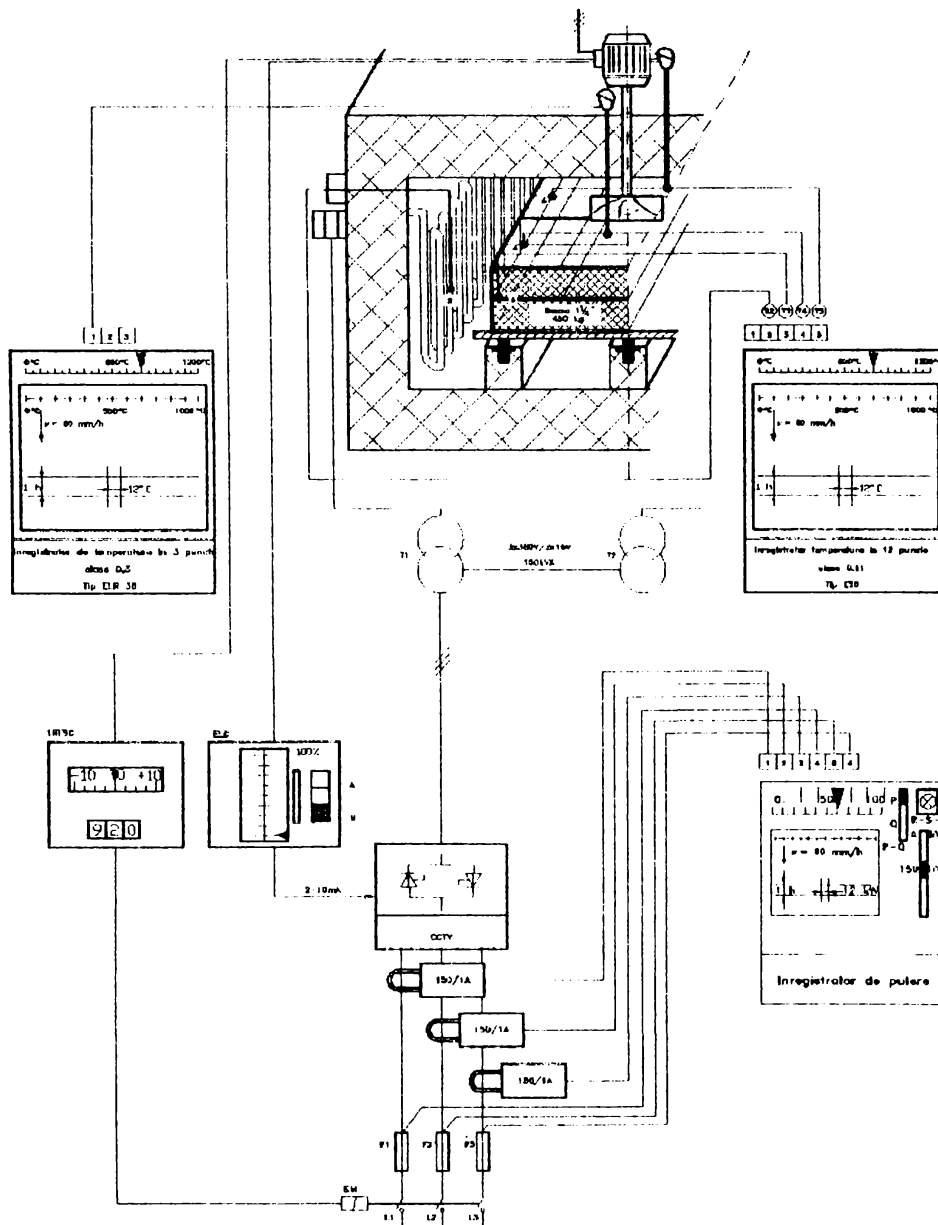


Fig.4.15 Structura standului de probe și măsurători experimentale

## 2°) Structura standului de probe și măsurători experimentale

Realizarea probelor, care să valideze rezultatele obținute prin simulare, a constituit o sarcină dificilă datorită necesității de a reproduce întocmai condițiile și operațiile tehnologice curente din exploatare. Dintre aceste dificultăți cea mai serioasă a fost introducerea șarjei echipată cu termocuple flexibile de control, în diferite zone ale ei, operație care s-a efectuat la temperatura cuptorului de 900 °C și mai ales din grija de a menține termocuplele în poziția fixată, intacte fizic și funcționale, în urma șocului termic și prin închiderea ușii cuptorului. În

Fig.4.15 prezintă modul de distribuție a termocuplelor (de tip Cromel-Alumel) în diferite zone ale șarjei și ale cuptorului, precum și structura și componența standului de probă. S-au efectuat înregistrări pe diagrame pentru temperaturile din șarjă, din interiorul rezistorului tubular și din cuptor precum și evoluția puterii electrice active absorbite de instalația de încălzire.

## 3°) Prezentarea diagramelor obținute prin simulare

În Fig.4.16 și Fig.4.17 sunt reprezentate diagramele obținute prin simularea unui proces de încălzire cu subrăcire a unei șarje constituită din repere bucși 1 1/4", prin care s-a urmărit evoluția temperaturii măsurate la termocuplul cuptorului, a temperaturilor la suprafața și în centrul șarjei, a temperaturii elementului rezistiv, precum și evoluția puterii injectate în rezistoare după funcția de comandă și reglare adaptivă.

Acesta a constituit **experimentul 1** în care s-au efectuat simulări ale șarjei model generate opțional sub formă de plăci (Fig.4.16) și sub forma de cuve (Fig.4.14), în modul de distribuire și configurare conform Tab.4.2, urmărindu-se elementele de comparație a rezultatelor obținute prin simulare între cele două modele de șarjă cât și cu cele obținute prin măsurători.

În Fig.4.19 și Fig.4.20 sunt reprezentate porțiuni "dilate" după axa timpului o porțiune corespunzătoare creșterii în temperatură a șarjei și o porțiune corespunzătoare timpului de menținere la temperatura de palier în scopul evidențierii cu claritate a modului cu care este comandat timpul de conectare a puterii electrice prin comanda adaptivă a regulatorului de temperatură.

În Fig.4.21 și Fig.4.22 sunt reprezentate diagramele obținute prin simulare unui proces de încălzire a unei șarje constituită din repere role SLP.

Acesta a constituit **experimentul 2** în care s-au efectuat simulări ale șarjei model generate opțional sub formă de plăci (Fig.4.21) și sub forma de cuve (Fig.4.22), în modul de distribuire și configurare conform Tab.4.2, urmărindu-se elementele de comparație a rezultatelor obținute prin simulare între cele două modele de șarjă cât și cu cele obținute prin măsurători.

În Fig.4.23 și Fig.4.24 sunt reprezentate diagramele obținute prin simulare unui proces de încălzire a unei șarje constituită din repere bucși SLP.

Acesta a constituit **experimentul 3** în care s-au efectuat simulări ale șarjei model generate opțional sub formă de plăci (Fig.4.23) și sub forma de cuve (Fig.4.24), în modul de distribuire și configurare conform Tab.4.2, urmărindu-se elementele de comparație a rezultatelor obținute prin simulare între cele două modele de șarjă cât și cu cele obținute prin măsurători.



## 4°) Prezentarea diagramelor înregistrate prin măsurători experimentale

În Fig.4.25 și Fig.4.26 sunt reprezentate înregistrate, obținute prin măsurători în cadrul experimentului 1, în care a fost supusă procesului de încălzire, menținere la palier (0,5h) și subrăcire șarja constituită din repere bucși 1 1/4", distribuite în coșuri sub formă de vrac și configurate pe două rânduri suprapuse. Au fost înregistrate temperaturile din șarjă la suprafață și în centru, la rezistor, pe diagrama reprodusă în Fig.4.26, precum și temperatura măsurată prin termocuplul cuptorului și comanda puterii electrice pe diagrama reprodusă prin suprapunere în Fig.4.25.

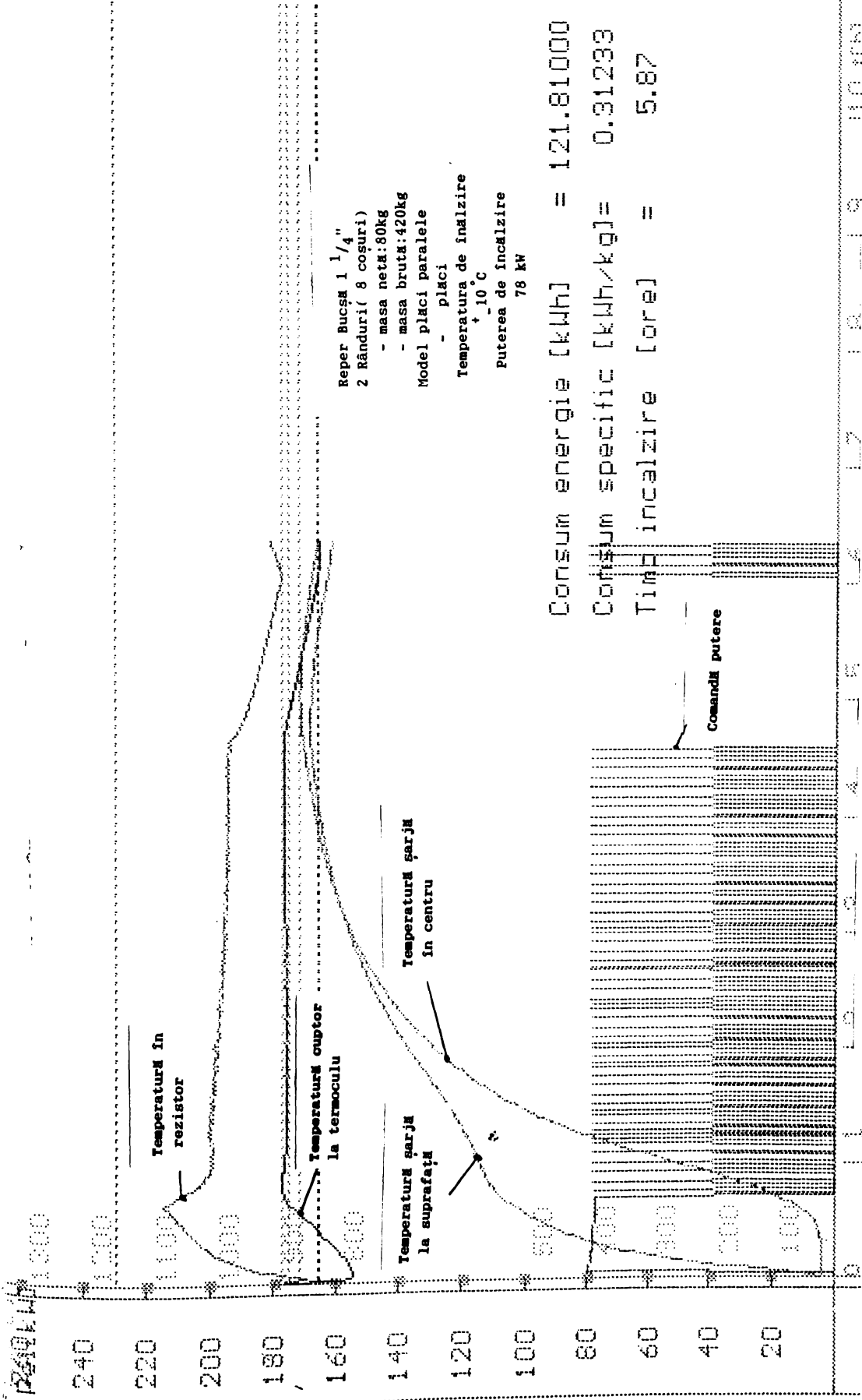
În Fig.4.27 sunt reprezentate diagramele înregistrate, obținute prin măsurători în cadrul experimentului 2, în care în care a fost supusă procesului de încălzire și menținere la palier (0,5h) șarja constituită din repere role SLP distribuite în coșuri sub formă de vrac și configurate pe un rând. Au fost înregistrate temperaturile din șarjă la suprafață și în centru și la rezistor.

În Fig.4.28 sunt reprezentate diagramele înregistrate, obținute prin măsurători în cadrul experimentului 2, în care în care a fost supusă procesului de încălzire și menținere la palier (0,5h) șarja constituită din repere bucși SLP distribuite în coșuri sub formă de vrac și configurate pe două rânduri suprapuse. Au fost înregistrate temperaturile din șarjă la suprafață și în centru și la rezistor.

În toate cazurile de testări experimentale prin simulare au fost introduse următoarele date de intrare:

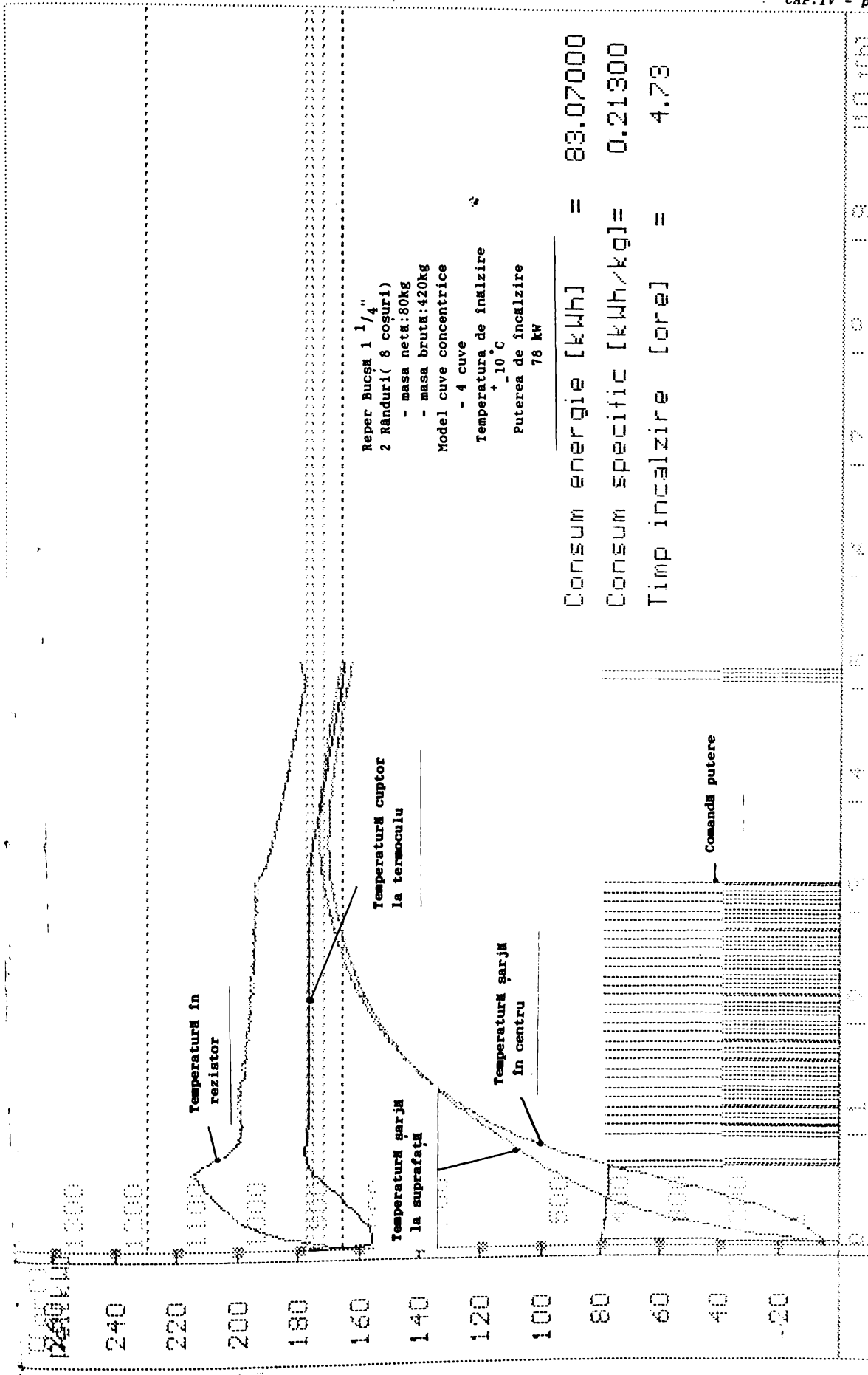
Temperatura initiala cuptor	[gr C]	: 900.00
Temperatura initiala sarja	[gr C]	: 20.00
Temperatura finala de incalz.sarja	[gr C]	: 880.00
Temperatura finala de racire sarja	[gr C]	: 830.00
Abaterea temperaturii max. sarja	[gr C]	: 10.00
Abaterea temperaturii min. sarja	[gr C]	: 10.00
Temperatura max. de utilizare rezistor	[gr C]	: 1150.00
Cota de sarjare la nivel de vatra	[m]	: 0.38
Adincimea de imersie termocuplu	[m]	: 0.20
Suprafata de deschidere usa	[mp]	: 0.56
Timpe de deschidere usa	[min]	: 2.00
Uiteza de circulatie atmosfera	[m/s]	: 2.00
Emisivitatea sarjei		: 0.60
Emisivitatea izolatiei peretelui		: 0.90
Timpe de esantionare - identificare	[sec]	: 90.00

Temperatura initiala cuptor	[gr C]	: 900.00
Temperatura initiala sarja	[gr C]	: 20.00
Temperatura finala de incalz.sarja	[gr C]	: 880.00
Temperatura finala de racire sarja	[gr C]	: 830.00
Abaterea temperaturii max. sarja	[gr C]	: 10.00
Abaterea temperaturii min. sarja	[gr C]	: 10.00
Temperatura max. de utilizare rezistor	[gr C]	: 1150.00
Cota de sarjare la nivel de vatra	[m]	: 0.38
Adincimea de imersie termocuplu	[m]	: 0.20
Suprafata de deschidere usa	[mp]	: 0.56
Timpe de deschidere usa	[min]	: 2.00
Uiteza de circulatie atmosfera	[m/s]	: 2.00
Emisivitatea sarjei		: 0.60
Emisivitatea izolatiei peretelui		: 0.90
Timpe de esantionare - identificare	[sec]	: 90.00
Incrementul de timp	[sec]	: 10
Nr. maxim de iteratii		: 100
Factor precizie iteratii		: 0.0010000
Timpe de mentinere	[ore]	: 0.50



Reper Bucșa 1 1/4"  
 2 Rânduri ( 8 coșuri )  
 - masa netă: 80kg  
 - masa brută: 420kg  
 Model plăci paralele  
 - plăci  
 Temperatura de încălzire  
 + 10 °C  
 Puterea de încălzire  
 78 kW

Fig.4.16 Simularea procesului de încălzire, menținere și subrăcire pentru șarje model plăci



Experimentul 1

Fig. 4.17 Simularea procesului de încălzire, menținere și subrăcire pentru șarje model cuve

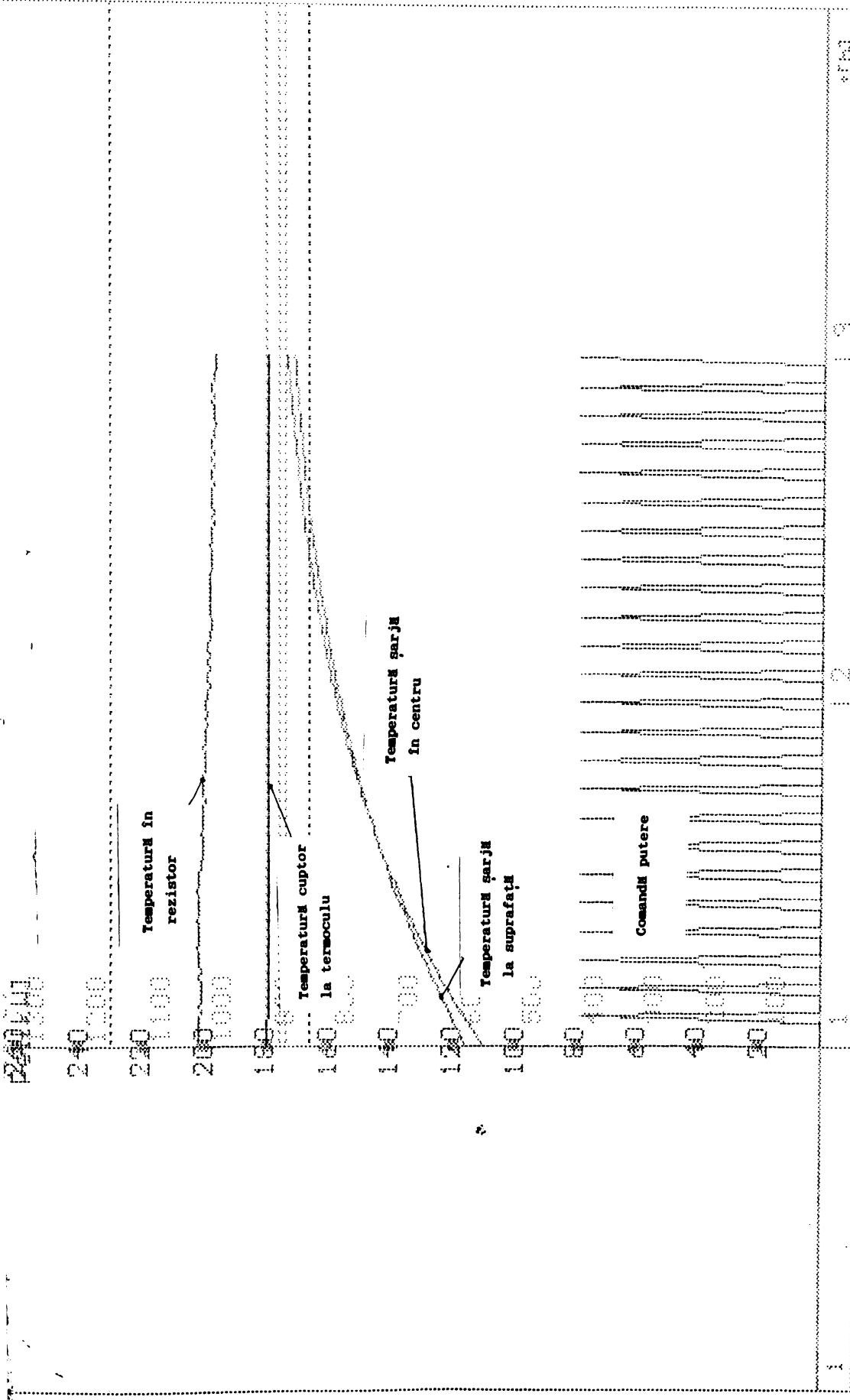


Fig.4.18 Porțiune din diagramă pe panta de încălzire a șarje (Experiment 1-Fig.4.17)

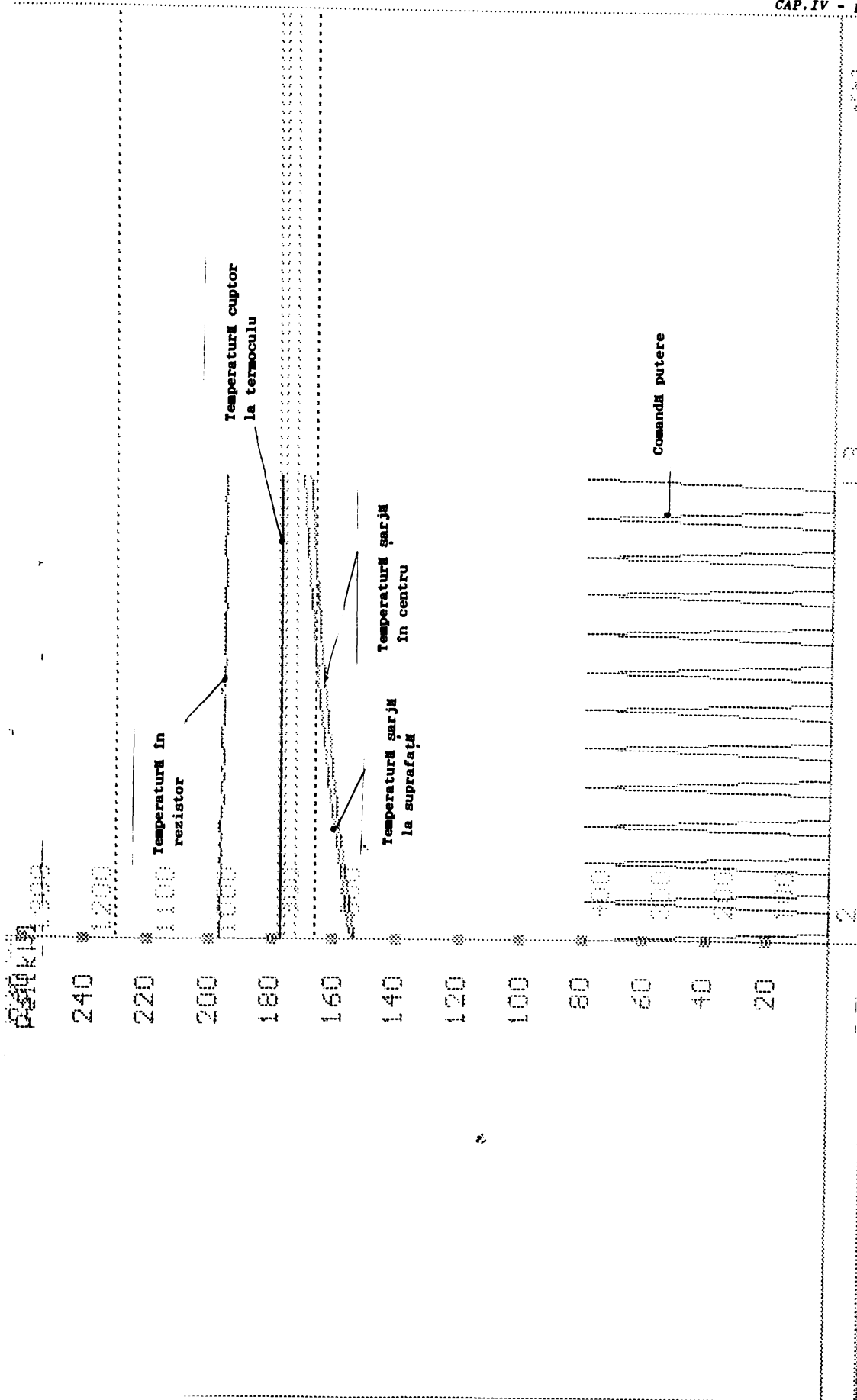
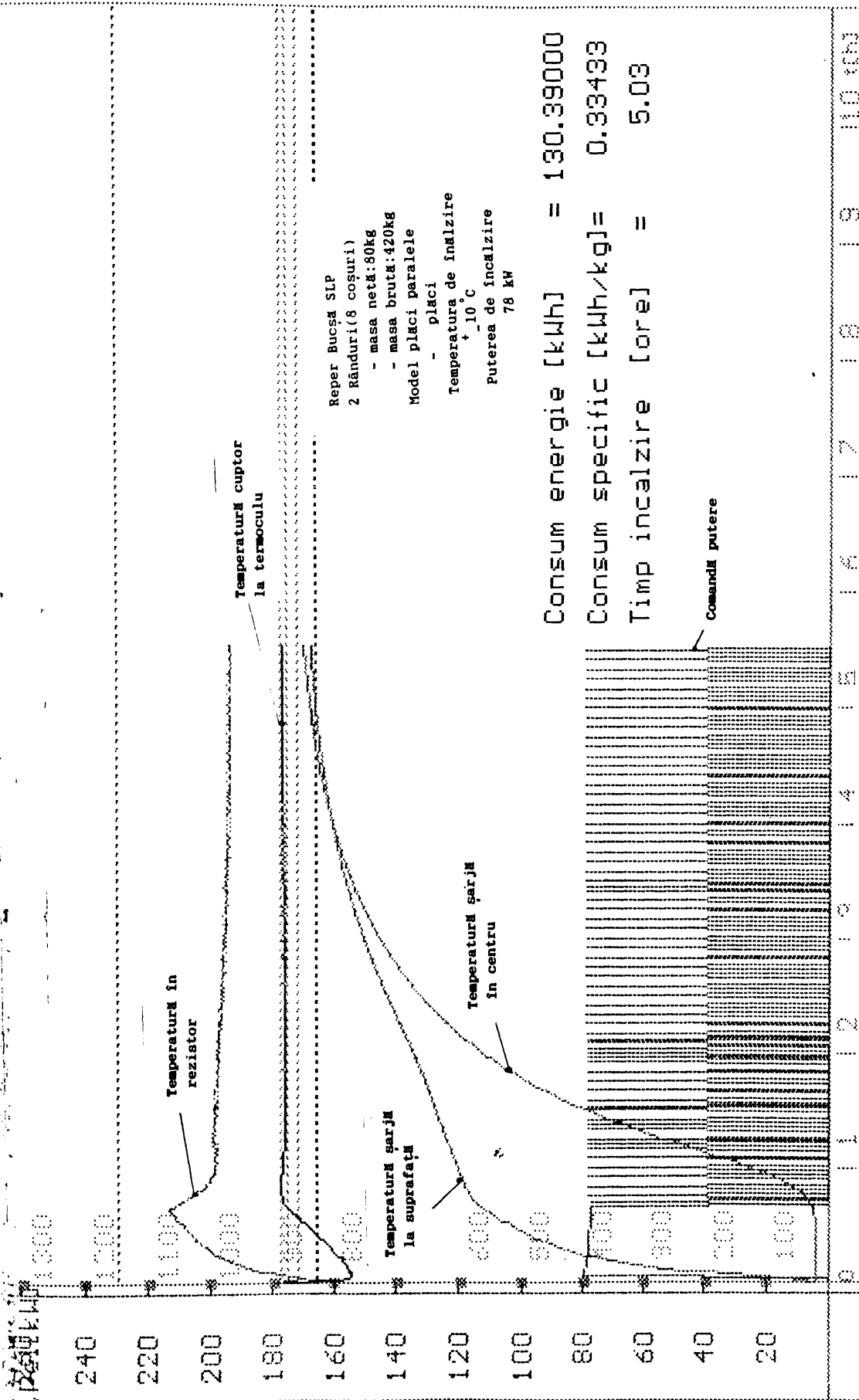
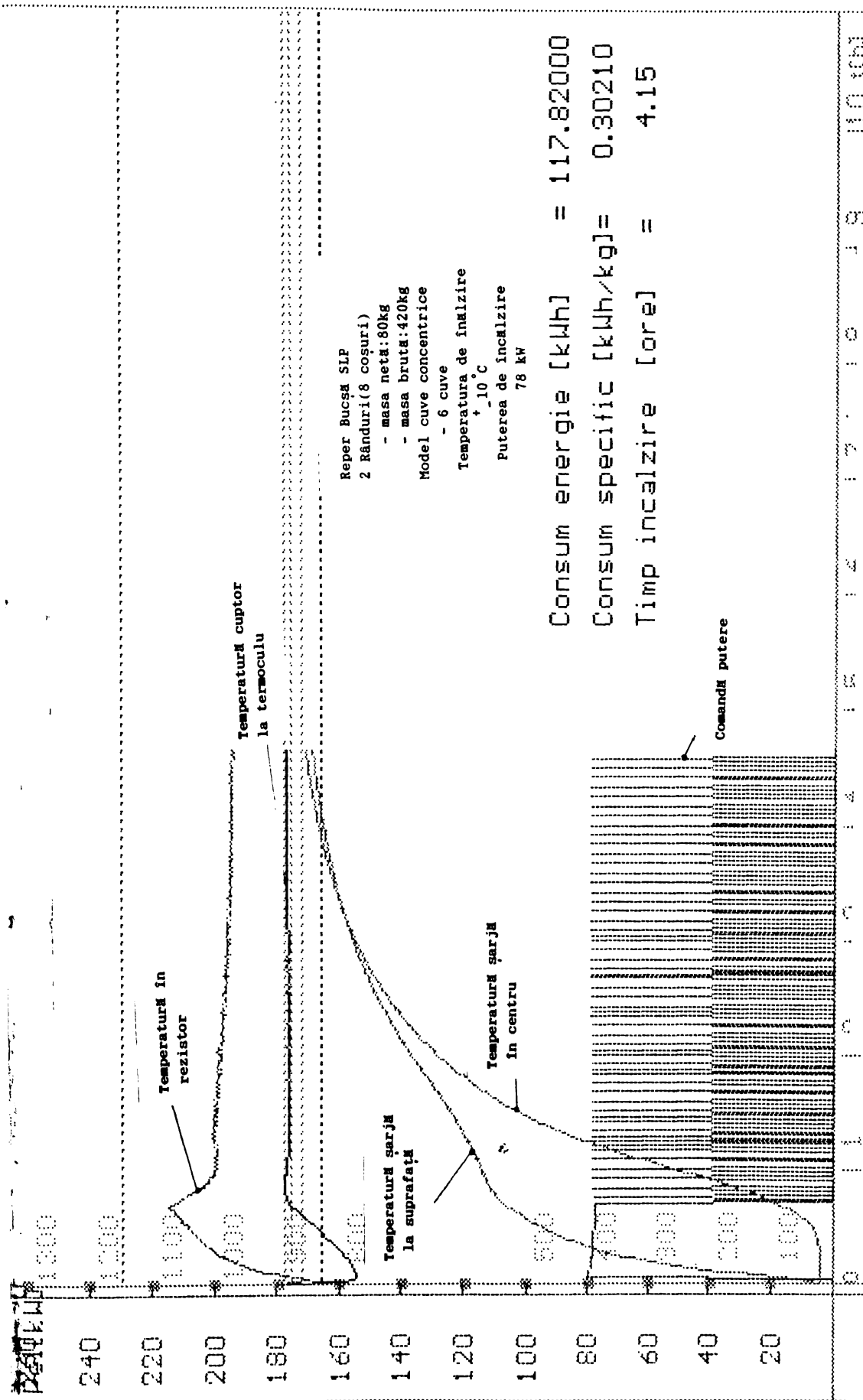


Fig.4.19 Porțiune din diagramă pe durata menținerii sarcii la palier (Experiment 1-Fig.4.17)

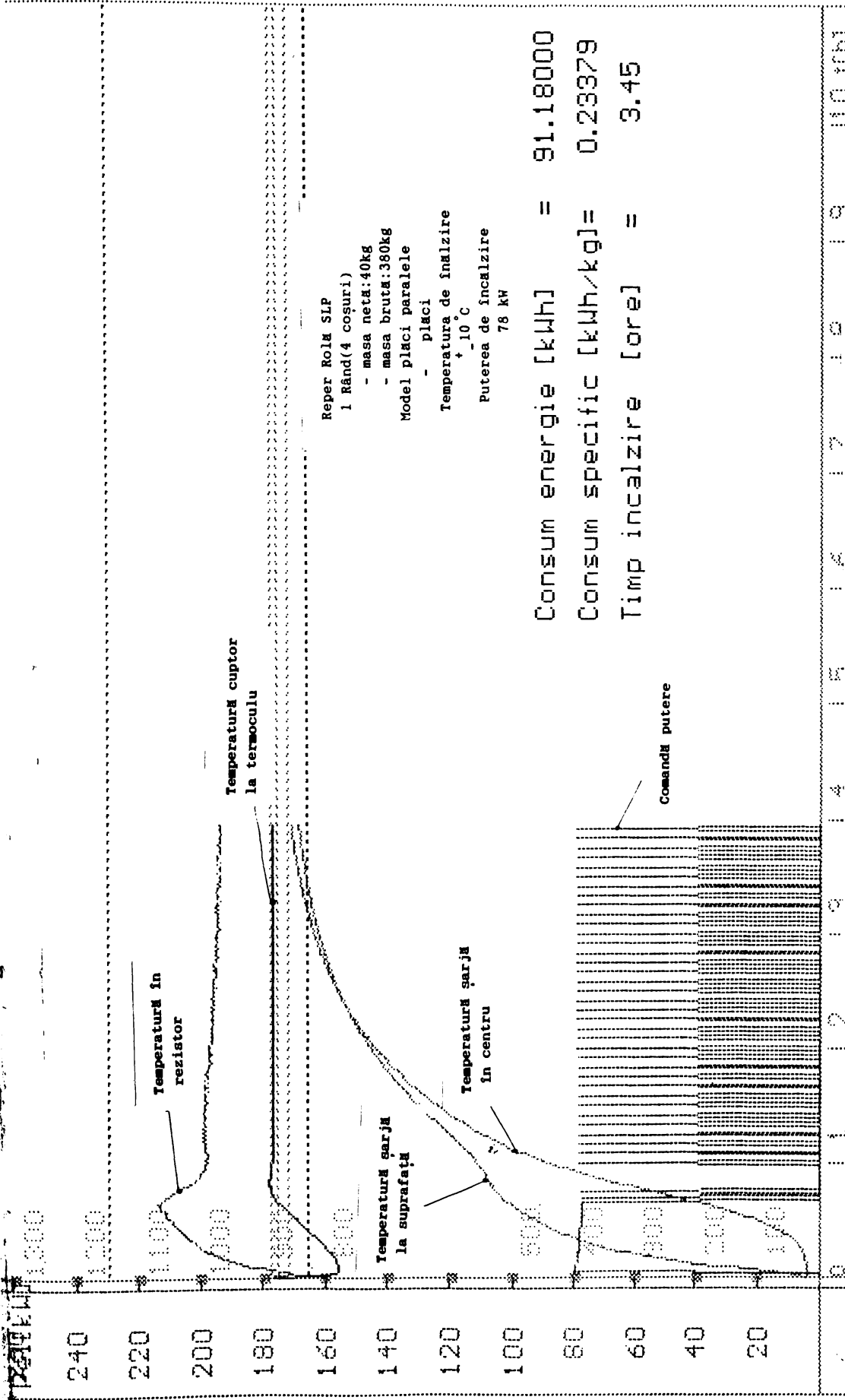


Experimentul 2  
 Fig. 4.20 Simularea procesului de încălzire și menținere pentru șarje model plăci



Experimentul 2

Fig.4.21 Simularea procesului de încălzire, menținere și subrăcire pentru șarje model cuve

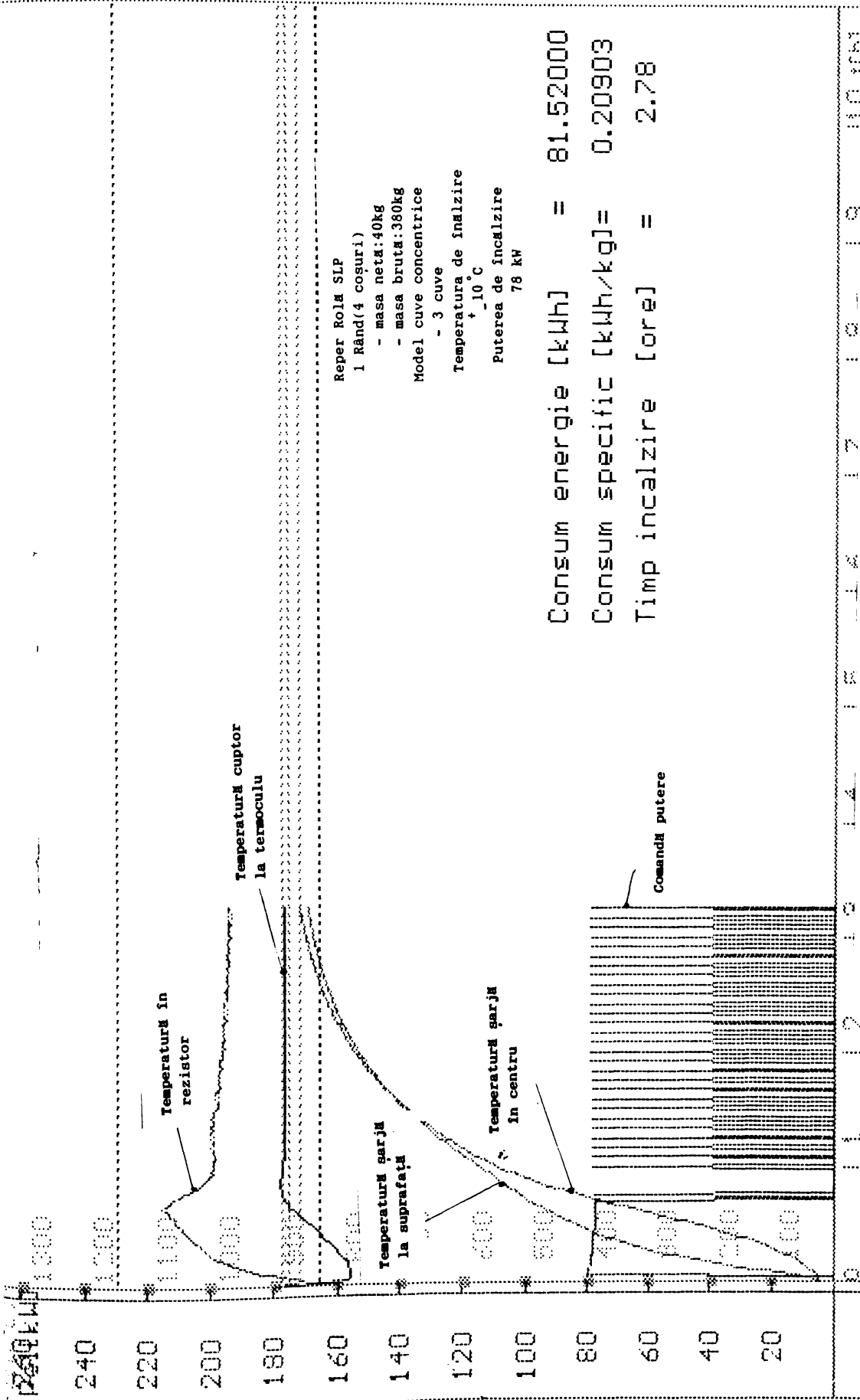


Experimentul 3

Fig.4.22 Simularea procesului de încălzireși menținere pentru șarje model plăci

Diagrama temperatură-putere-timp





Experimentul 3

Fig.4.23 Simularea procesului de încălzire și menținere pentru șarje model cuve

Diagrama temperaturii și puterii timp

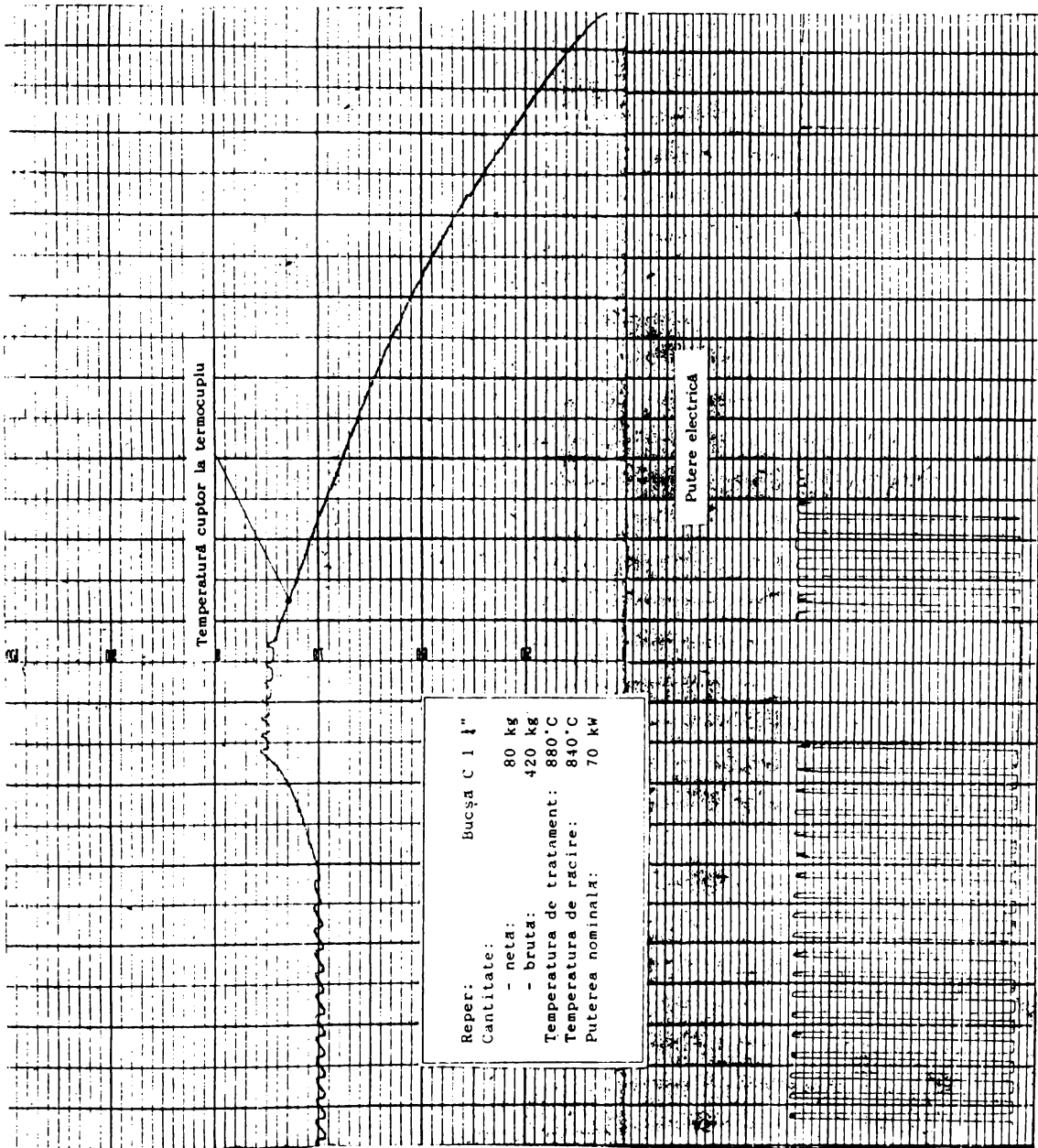


Fig.4.24 Diagrama temperaturii înregistrate în cupor și diagrama de comandă a puterii (Măsurători experiment 1)

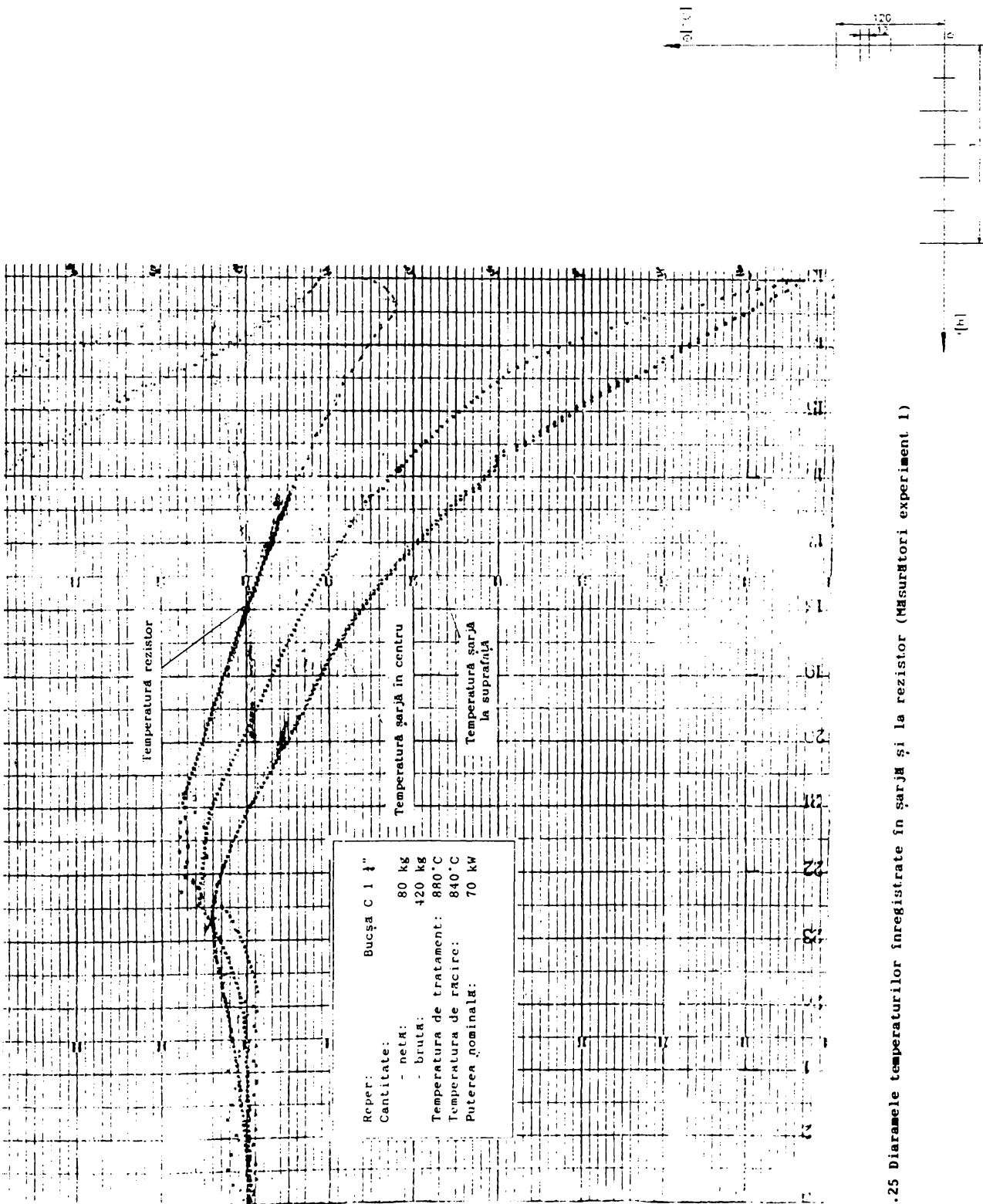


Fig.4.25 Diarama temperaturilor înregistrate în șarjă și la rezistor (Măsurători experiment 1)

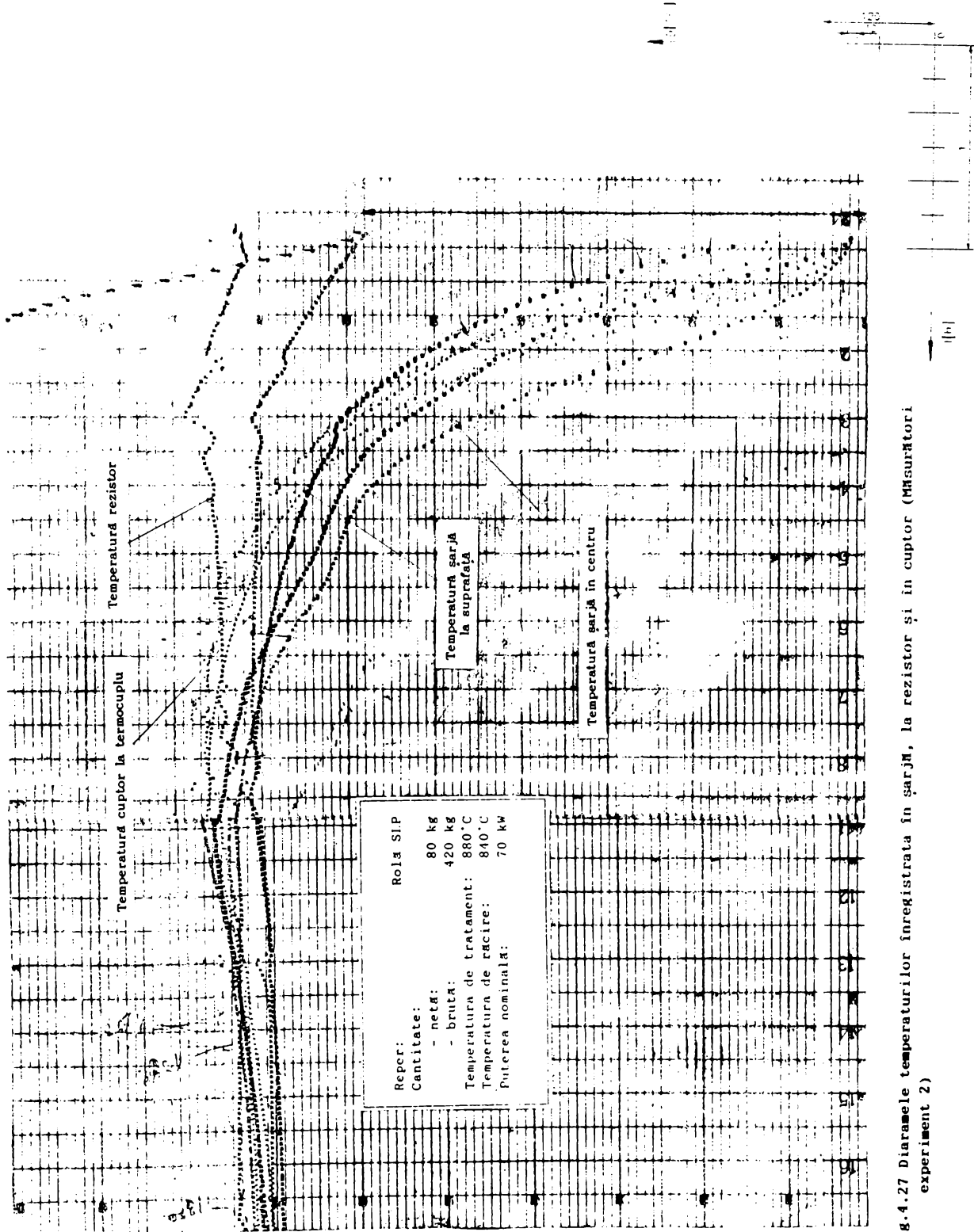


Fig.4.27 Diarama temperaturilor înregistrată în șarjă, la rezistor și în cuplor (Măsurători experiment 2)

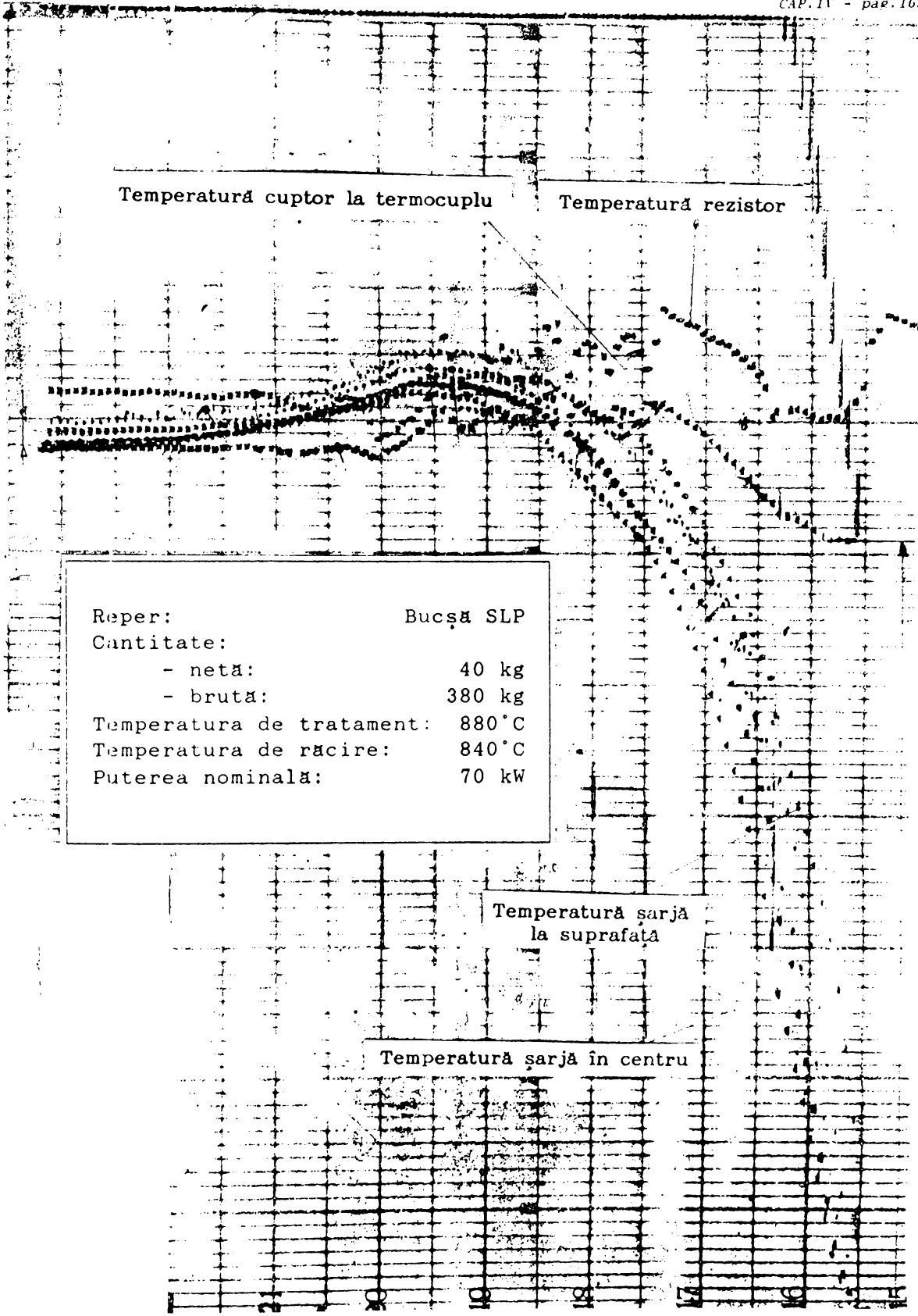
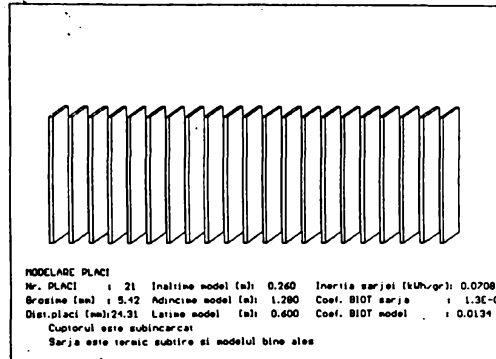
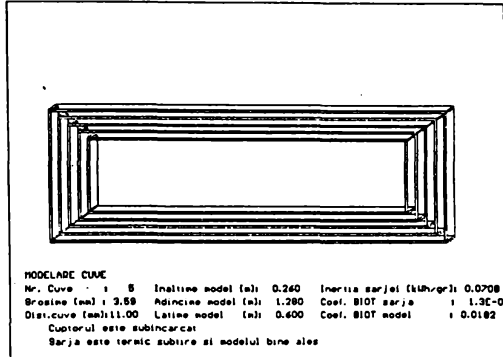
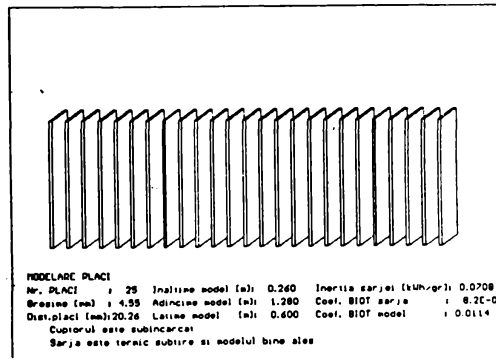
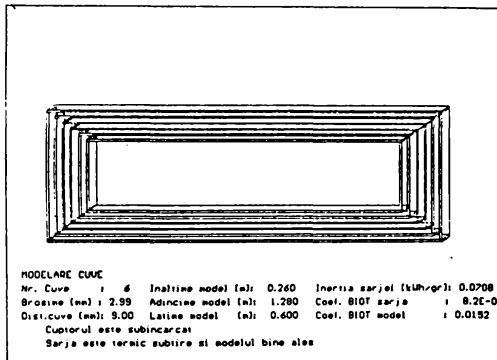


Fig.4.28 Diaramele temperaturilor înregistrate în sarjă, la rezistor și în cuptor (Măsurători experiment 3)

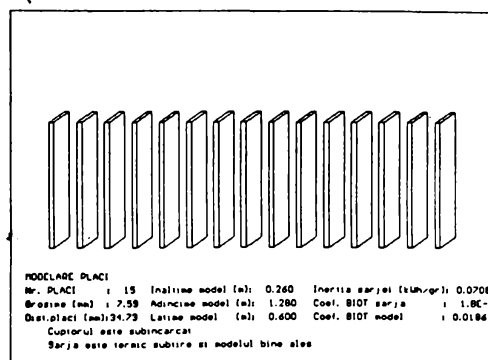
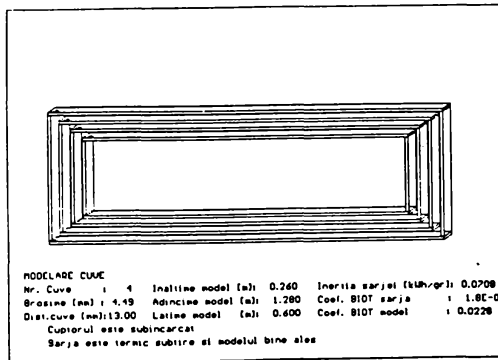
În ecranele de mai jos sunt prezentate structurile modelelor de șarje supuse proceselor de simulare a încălzirii în cazul experimentelor efectuate:



**Model de șarjă tip plăci și tip cuve utilizate în simularea încălzirii în cazul experimentului 1**



**Model de șarjă tip plăci și tip cuve utilizate în simularea încălzirii în cazul experimentului 2**



**Model de șarjă tip plăci și tip cuve utilizate în simularea încălzirii în cazul experimentului 3**

#### IV.4.3 Comparații între rezultatele obținute prin simulare cu cele obținute prin măsurători.

În Fig.4.29 și Fig.4.30 sunt reprezentate pe aceeași diagramă evoluțiile în timp a temperaturilor obținute prin simulare, pentru două variante ale modelului de șarjă și înregistrate prin măsurători pentru punctele de control de la suprafață și respectiv din centrul șarjei.

În Fig.4.31 și Fig.4.32 sunt reprezentate pe aceeași diagramă evoluțiile în timp a temperaturilor obținute prin simulare, pentru cele două variante ale modelului de șarjă și înregistrate prin măsurători în punctul de prelevare a termocuplului și respectiv în rezistor.

În Fig.4.33 sunt reprezentate pe aceeași diagramă evoluțiile puterii medii absorbite pe durata ciclului de încălzire, obținute prin simulare pentru cele două variante ale modelului de șarjă și înregistrată prin măsurători.

Datele pe baza cărora s-au obținut aceste diagrame sunt cele referitoare la experimentul 1.

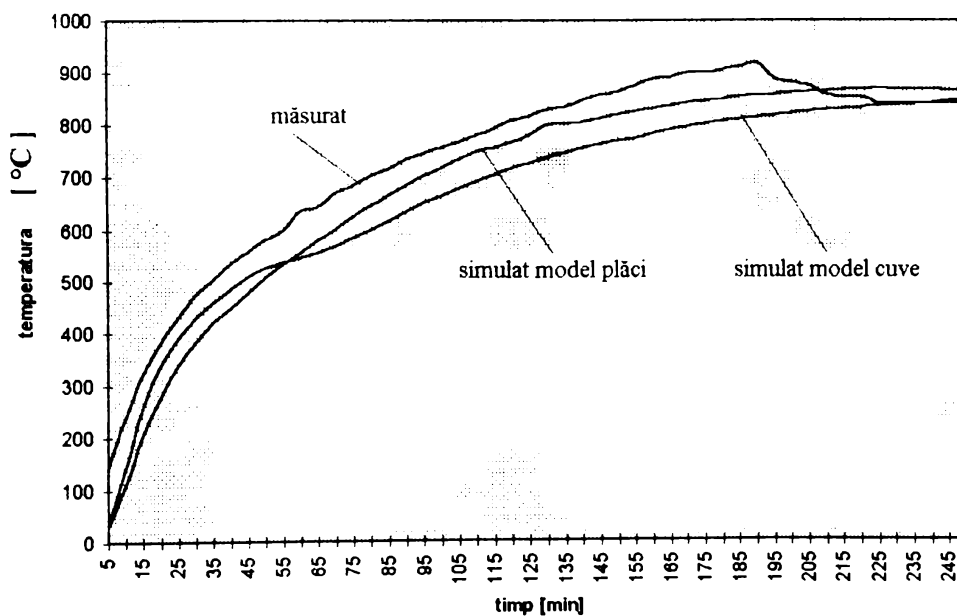


Fig.4.29 Comparație între curbele de încălzire la suprafața șarjei măsurată și simulate prin experimentul 1

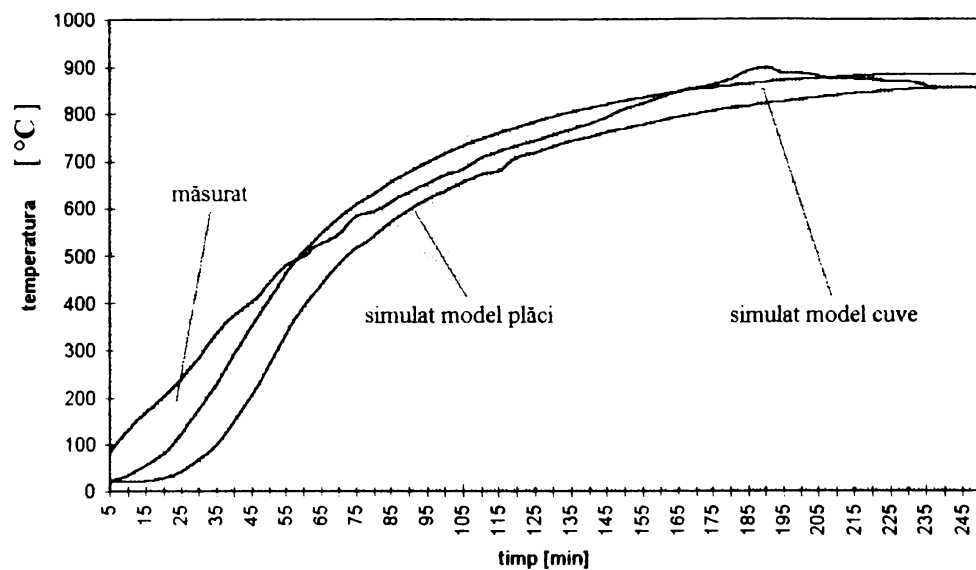


Fig.4.30 Comparație între curbele de încălzire în mijlocul șarjei, măsurată și simulate prin experimentul 1

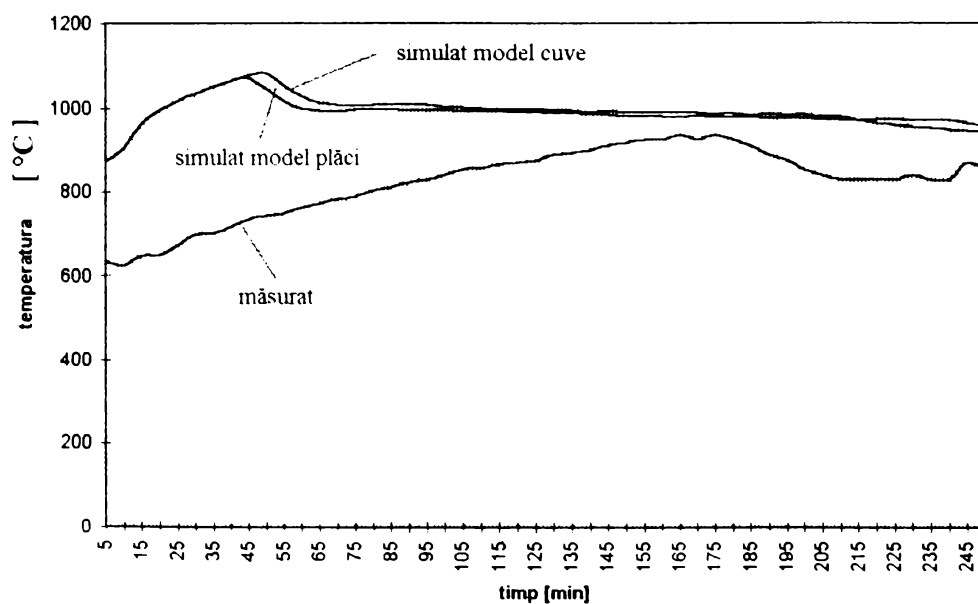


Fig.4.31 Comparație între curbele de încălzire la termocuplu, măsurată și simulate prin experimentul 1



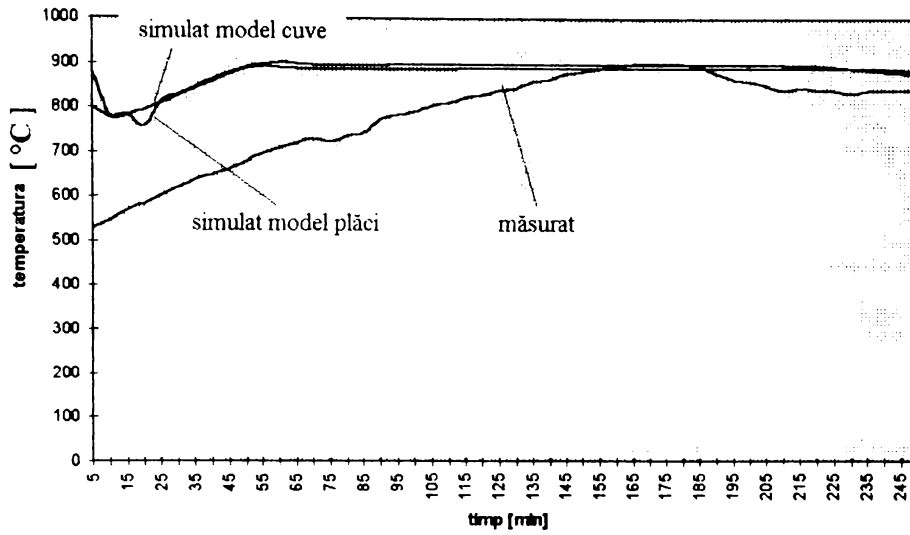


Fig.4.32 Comparație între curbele de încălzire rezistoare , măsurată și simulate prin experimentul 1

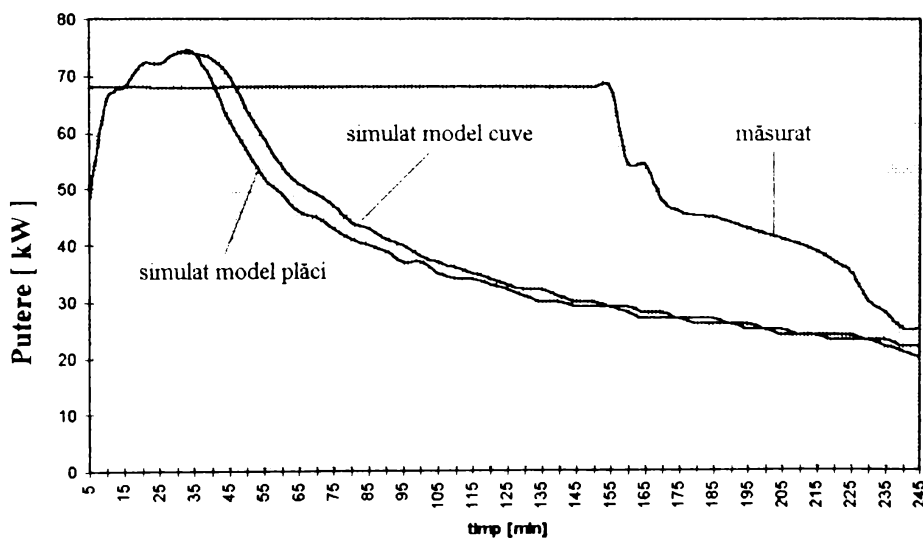


Fig.4.33 Comparație între curbele puterii absorbite, măsurată și simulate prin experimentul 1

Comparând rezultatele obținute prin simularea procesului de încălzire a șarjei model cu cele obținute prin măsurători experimentale se impun următoarele precizări și comentarii:

**a) privind tehnicile și procedurile implicate în procesul de simulare**

- modelul de șarjă tip *cuve concentrice* conduce la rezultate mult mai precise, privind determinarea timpilor de încălzire a șarjei prin simulare, care se apropie mult de cei determinați prin măsurători, pentru șarje reale ce nu depășesc  $2H_c/3$ ;

- procedura de calcul iterativ asigură o convergență rapidă a soluțiilor în **max.10** iterații;

- pasul de timp de **max.10s** asigură stabilitatea necesară soluțiilor determinate pas cu pas nemaifiind nevoie de corecția pasului de timp prin determinarea minimului constantelor de timp implicate în procesul de acumulare;

- factorul de precizie de **min.10<sup>-3</sup>**, implicat în criteriul de convergență, conduce la rezultate corespunzătoare, nefiind necesară o valoare mai mică care ar necesita creșterea numărului de iterații și la creșterea erorilor de trunchiere;

- eșantionul de timp optim, în procedura de identificare a parametrilor funcției de reglare, este de **min.90s**.

**b) privind rezultatele obținute prin simulări și măsurători**

Analiza comparativă a rezultatelor efectuată pentru cazul **experimentului 1** scoate în evidență următoarele aspecte:

1\*) timpul de încălzire uniformă în întreaga masă a șarjei la temperatura de tratament de  $880^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  este de **3,5h** pentru *simularea încălzirii șarjei model în plăci* (vezi Fig.4.16), de **2.5h** pentru *simularea încălzirii șarjei model în cuve* (vezi Fig.4.17) și de **2,3h** obținut prin *măsurători* (vezi Fig.4.26). Se observă o determinare prin simulare a timpului de încălzire cu o precizie sub **10%** în cazul utilizării la simulare a modelului de șarjă de tip cuve. Explicația acestei abateri este aceea că șarja model conține masa brută a șarjei reale iar înregistrările experimentale s-au efectuat în puncte din piesa propriu-zisă.

Pentru modul de configurare a șarjei în cuptor, în conformitate cu datele enunțate pentru experimentul 1, modelul de șarjă de tip plăci conduce la un timp de încălzire de aproximativ **2 ori** mai mare. Explicația acestei abateri este aceea că modelul de șarjă în plăci paralele asigură o receptare a fluxului termic total emis de sursă decât pe prima placă;

2\*) curba evoluției temperaturii la suprafața șarjei (vezi Fig.4.29) prezintă o alătură asemănătoare pentru simularea încălzirii, în cazul celor două modele, cu precizarea că în cazul modelului de șarjă în plăci viteza de încălzire este mai mică.

Prin rezultatele obținute prin înregistrarea temperaturii în șarja reală, se observă că viteza de încălzire este mai mare în realitate decât cea obținută prin simulări. Acest fapt se poate datora radiației rezistorului asupra termocuplului amplasat la marginea laterală a coșului, într-o piesă, iar pe de altă parte datorită modelului de șarjă care ia în considerare întreaga masă a șarjei brute.

Așa cum se observă din figură procesul de încălzire la suprafață are, în cazul simulării, o alătură fără suprareglare (depășire a valorii prescrise), în

raport cu alinura curbei obținută prin măsurători. Acest fapt se datorează funcției de reglare adaptivă a puterii injectate, în rezistoare, implementată în algoritmul de simulare, funcție de care nu dispune regulatorul din dotarea cuptorului experimental;

3°) curba evoluției temperaturii într-un punct care corespunde centrului geometric al șarjei (vezi Fig.4.30), prezintă o întârziere în atingerea temperaturii prescrise în cazul modelului de șarjă în plăci.

Prin rezultatele obținute prin înregistrarea temperaturii în șarja reală se observă că viteza de încălzire este mai mare în realitate decât cea obținută prin simulări, la începutul încălzirii și mai mică la sfârșitul încălzirii. Acest fapt se poate datora unui aport mai mare al transferului termic convectiv în realitate decât cel precizat la simulare prin indicarea unei viteze de 2 m/s a gazelor recirculate în camera de tratament a cuptorului;

4°) curba evoluției temperaturii în rezistor (vezi Fig.4.31) prezintă abateri destul de mari, în alinură, a celor obținute prin simulări față de cea înregistrată prin măsurători. Explicația este aceea că măsurarea temperaturii în elementul încălzitor s-a efectuat printr-un termocuplu introdus în mediul interior al tubului rezistor nefiind admis un contact direct cu peretele acestuia. Pe de altă parte prin interiorul tubului circulă un aer prelevat din mediul exterior al cuptorului, captat și evacuat prin terminalele rezistorului. Alte explicații se poate formula prin influența reglajului adaptiv al temperaturii din cuptor, în cazul simulării, precum și variației tensiunii de alimentare la bornele rezistorului care în realitate pot fi destul de importante pe durata unui ciclu complet de încălzire.

Căderea de temperatură a rezistorului prin operația de șarjare este mai mare în realitate datorită timpului necesar introducerii șarjei în cuptor care a fost mult mai lung decât cel indicat la simulare. Această întârziere s-a datorat precauțiilor cu care s-a efectuat operația de șarjare pentru menținerea integrității termoculelor amplasate în șarjă;

5°) curba evoluției temperaturii în incinta de tratament a cuptorului (vezi Fig.4.32) prezintă abateri destul de mari, în alinură, a celor obținute prin simulări față de cea înregistrată prin măsurători. Explicațiile sunt aceleași ca cele formulate anterior (alinatul 4°);

6°) curba evoluției puterii electrice injectate în rezistoare (vezi Fig.4.33) prezintă abateri importante ca alinură între cele obținute prin simulări față de cea înregistrată prin măsurători. Explicația acestor abateri este dată de principiul de dozare continuu-adaptivă a puterii prin funcția de reglare cu identificare și autoacordare a parametrilor funcției de reglare implementată în algoritmul programului de simulare. Parametrii de reglare ai regulatorului din dotarea cuptorului au fost acordați manual la începutul încălzirii la valori care să asigure o stabilitate la temperatura de tratament.

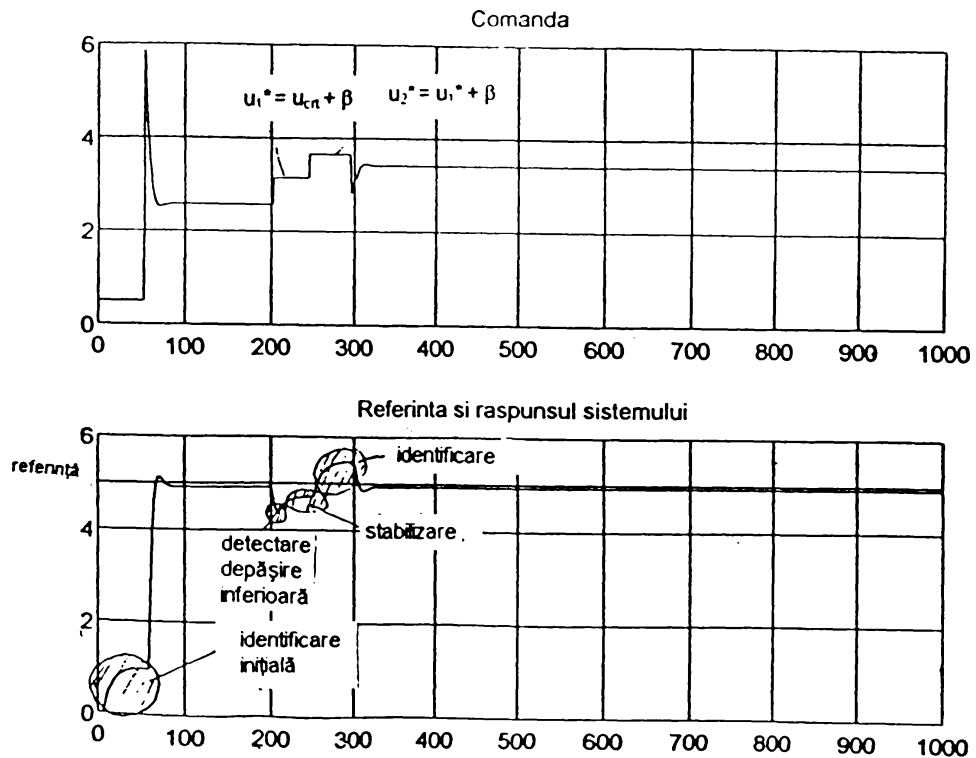
Atât curba înregistrată cât și cele obținute prin simulări conduc la sfârșitul procesului de încălzire a șarjei la valoarea pierderilor la mers în gol (20kW), respectiv la necesarul de putere pentru acoperirea acestor pierderi la stabilitate;

Efectul acestor abateri se reflectă în consumul specific de energie electrică raportat la unitatea de masă a șarjei brute care prin simulări este de 0.31kW/kg iar cel obținut prin înregistrarea contorului de energie este de 0.4kW/kg. Această diferență reprezintă în realitate o pierdere nejustificată și care se datorează în exclusivitate unui reglaj al puterii neacordat corespunzător.

Concluzionând rezultatele testării programului **TRATERM** pornind cu identificarea parametrilor termici ai cuptorului, identificarea parametrilor nominali ai instalației de încălzire, prin modelarea șarjelor și finalizând cu simularea procesului de încălzire se poate remarca rezultatele corespunzătoare ale simulării în comparație cu cele obținute prin măsurători experimentale. Abaterile semnalate au justificări care pun în evidență superioritatea informațiilor obținute cu anticipare prin simulare, informații ce pot constitui criteriile de pregătire tehnologică a procesărilor reale și asigurarea unor consumuri specifice minime prin asigurarea unei procesări corespunzătoare.

#### IV.5 VALIDARE EXPERIMENTALĂ A PROGRAMULUI DE REGLARE ADAPTIVĂ

Programul de reglare autoadaptivă **ADAPT\_T** a fost conceput pentru a fi instalat pe un chipament de conducere *on-line* a unui parametru de proces. În structura programului de simulare a procesului de încălzire acest program rulează numai parțial și anume în faza de identificare și de autoacordare a parametrilor funcției de reglare, reacționând și în cazul apariției unei perturbații aleatorii ce pot apărea în procesările reale. Din acest motiv s-a impus efectuarea unei testări separate prin instalarea lui în memoria unui controler de proces care urmează a face parte dintr-o structură distribuită de *hardware* destinată conducerii numerice a proceselor tehnologice de tratament termic. În Fig.4.34 este reprezentat răspunsul algoritmului la semnalul din proces care atestază acordarea corectă prin identificare și stabilitatea reglării. Cu toate că rezultatele sunt suficient de încurajatoare se impune continuarea verificărilor experimentale pentru validarea corectitudinii algoritmului și pentru alte tipuri de cuptoare, în special al celor din noua generație cu inerție termică redusă. Este posibil ca în aceste situații aproximarea procesului ca fiind de ordinul 2 să nu mai fie satisfăcătoare și să se impună o alta aproximare printr-o funcție de ordin superior.



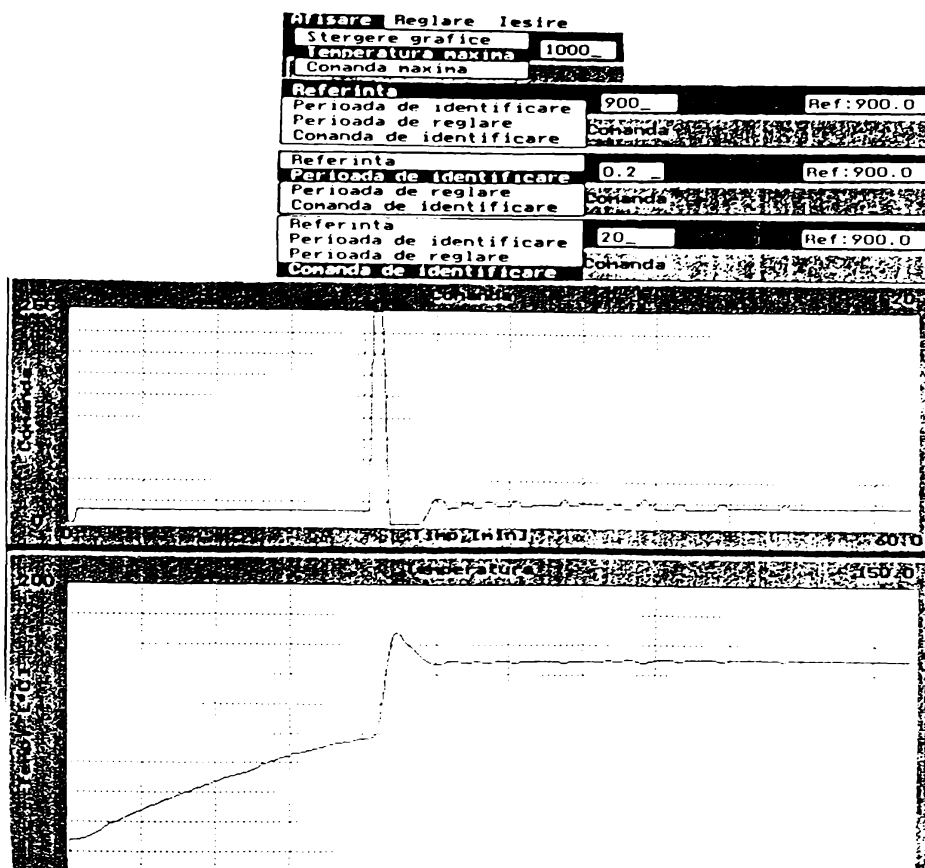


Fig.4.34 Simularea comenzii adaptive prin controler de proces

#### IV.6 TESTAREA PRIN SIMULARE A PROGRAMULUI DE TRATAMENT TERMOCHIMIC DE CARBURARE.

Datorită lipsei unei instrumentații specifice pentru controlul conținutului de carbon din atmosfera cuptorului (sondă de  $O_2$ ), acest program nu a putut fi validat decât prin simulare într-o configurație de hardware care a inclus un program, instalat pe un calculator, cu rolul simulării derulării unui proces real din cuptor și un calculator conținând programul de simulare a procesului de carburare **SIMUL\_CARB** pe baza căruia se conduce procesul. Cu toate că nu a fost validat în condițiile în care este conceput a funcționa, rezultatele simulării sunt deosebit de încurajatoare și în special în direcția optimizării ciclurilor de tratament ce pot fi reduse cu până la 50% din durată. Efectele scontate sunt atât de natură energetică cât și natură calitativă deoarece întreg procesul este condus după evoluția parametrului în piesa de tratat, evoluție care este simulată în timp real și care are ca elemente de control date reale prelevate continuu din proces.

În Fig.4.35 sunt reprezentate diagrame obținute prin simularea programului în diferite faze ale procesului. Trebuie subliniat un lucru important și anume acela că timpul de procesare tehnologică rezultă din efectuarea fazelor ce se derulează în piesă și nu este un parametru prescris.

Simulare proces    Bepere    Materiale

Proces cu doua secvente						
Faza	Temperatura	Potential Carbon:	Stare faza	Stare relec		
					1	2 3 4
1. Mentinere	600 °C	Oprtit	0.6 XC	5 min		
2. Incalzire	3 °C/min	Oprtit	XC	860 °C		
3. Incalzire	3 °C/min	Auto 8 %	XC	930 °C		
4. Mentinere	930 °C	Auto 8 %	XC	86 % XAI		
5. Mentinere	930 °C	C.margine	0.71 XC	99 %AI		
6. Racire	5 °C/min	C.margine	0.71 XC	850 °C		
7. Mentinere	850 °C	C.margine	0.71 XC	30 min		

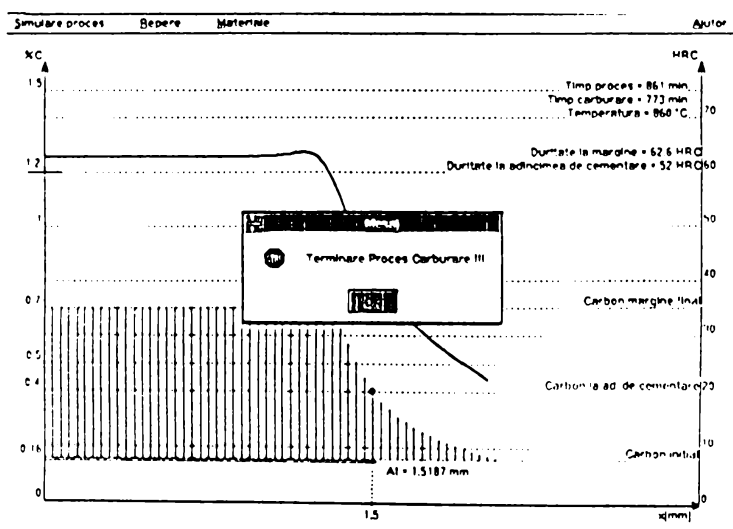
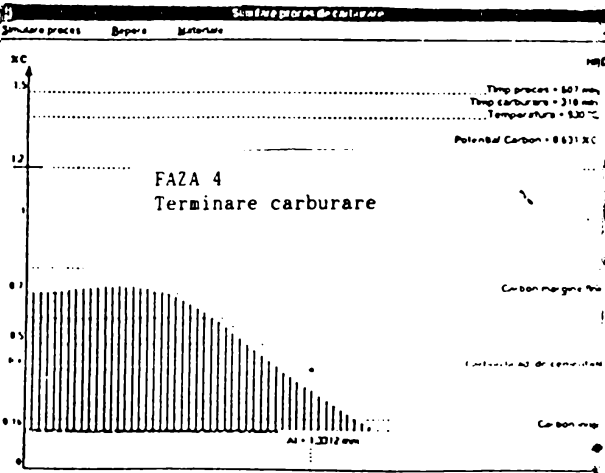
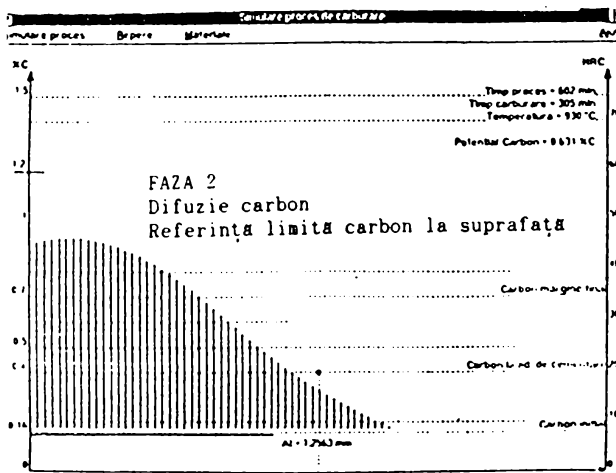
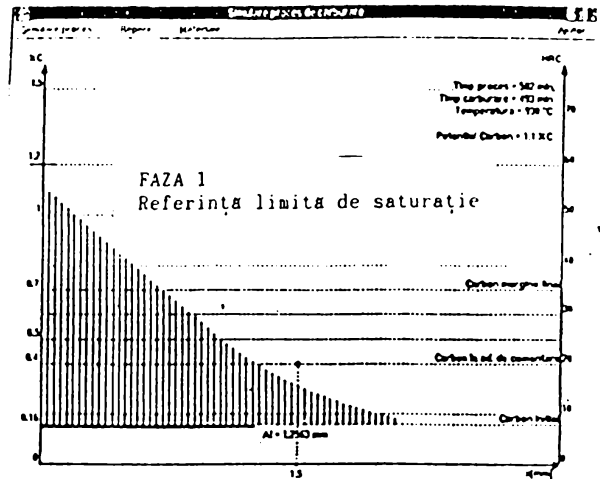


Fig.4.35 Simularea procesului de carburare pe faze tehnologice

## **CAP. V POSIBILITĂȚI DE VALORIFICARE A REZULTATELOR LUCRĂRII**

Acest capitol prezintă câteva din posibilitățile de valorificare a rezultatelor lucrării. Obiectivul lucrării constă în crearea unui instrument de testare prin modelări și simulări a posibilităților de îmbunătățire a performanțelor energetice a cuptoarelor cu încălzire indirectă prin rezistoare, precum și de *determinare cu anticipare a unor regimuri tehnologice optime de procesare*.

Obiectivul vizând realizarea unor regimuri optime de exploatare a cuptoarelor trebuie menținut și după simulare, respectiv pe întreaga durată de desfășurare a ciclului de tratament tehnologic. În acest scop trebuie create structuri adecvate de *hardware și software* pentru conducerea programată a procesărilor tehnologice pe baza diagramelor determinate *off-line* prin simulare.

Funcțiile de reglare a parametrilor în regim de conducere *on-line* trebuie să fie realizate prin aparate reglatoare echipate cu *soft propriu de identificare și autoacordare adaptivă* a parametrilor funcției de reglare.

Modalitățile de valorificare constau în următoarele:

a) utilizarea programelor de modelare și de simulare, atât în *activitatea de cercetare-proiectare constructivă*, cât și în *activitatea de pregătire tehnologică* la utilizatori, în vederea testării și determinării prin modelare și simulare, fără probe experimentale, a performanțelor termice și tehnologice ale cuptoarelor. Programul **TRATERM** permite analiza diferitelor variante constructive alternative posibile pentru îmbunătățirea performanțelor cuptorului, prin rularea subprogramelor **MOD\_CUP** și **CALC\_REZ**, precum și determinarea cu anticipare un regim optim de procesare sau de utilizare a cuptorului, rulând subprogramele **SIMUL\_TERM** și **MOD\_CUP**;

b) utilizarea rezultatelor obținute prin simulare pentru întocmirea de către tehnologi a unor *diagrame optime de procesare*, fie prin mijloacele de automatizare existente în dotarea cuptorului, fie prin echipamente de conducere proces [40,41]. Acestea pot fi obținute prin rularea în întregime a programului **TRATERM** pentru a crea baza de date referitoare la parametrii cuptorului și procedând la rularea subprogramelor **MOD\_ȘARJ** și **SIMUL\_TERM** pentru testarea regimului optim de procesare pentru diferite condiții tehnologice și pentru diferite moduri de configurare a șarjei în cuptor;

c) programul **SIMUL\_CARB** poate a fi instalat pe un calculator PC ca *sursă de conducere proces*, fie în mod direct printr-un calculator conectat la proces prin interfețe specializate, fie prin intermediul unor echipamente de programare și reglare separată [50]. Acest program poate fi utilizat independent de programul **TRATERM** însă necesită date rezultate din acesta privind vitezele de încălzire și timpii de încălzire și răcire, ce trebuie introduse ca date de intrare;

d) programul **ADAPT\_T** poate fi utilizat în următoarele variante operaționale, fie ca *subprogram expert în programe de simulare sau conducere proces*, fie ca *program propriu de reglare* implementat în memoria reglatoarelor sau controlerelor programabile cu comandă numerică [38,39,40]. Utilizarea principală o reprezintă această a doua opțiune;

Pentru extinderea ariei de utilizare se impun unele precizări:

- pentru alte tipuri de cuptoare pot fi create programe separate sau un program integrat pentru o familie distinctă de cuptoare, utilizând structura de

bază a programului **TRATERM** ;

- pentru alte tipuri de șarje constituită din repere tehnologice cu caracteristici geometrice specifice, se poate interveni în subprogramul de modelare șarje și completa algoritmul de generare model termic care să corespundă tipului de șarjă, modului de distribuție și configurare și caracteristicilor de material;

- pentru simulări de procese tehnologice ce impun derulări ale fazelor de încălzire sau răcire cu gradienti impuși trebuie intervenit în subprogramul de simulare pentru completarea acestuia cu respectiva opțiune și în tabloul datelor de intrare pentru specificarea mărimii gradientului și a fazei din procesul de simulare la care se referă, precum și revizuirea condițiilor și metodologiei de comandă a puterii;

- pentru simularea încălzirii unei șarje care prezintă forme geometrice neliniare se poate completa subprogramul de calcul al factorilor de vedere cu procedura de aproximare a incrementului de contur;

- pentru simularea procesului de încălzire utilizând comanda de modulare a puterii prin echipamente electronice de putere cu tiristoare cu comandă prin tăiere de undă se poate interveni în programul de comandă adaptivă și în subprogramul de simulare pentru a introduce procedura de dozare a puterii prin variația tensiunii pe sarcină și pentru determinarea pe fiecare perioadă de conducție a unghiului de comandă pentru amorsarea tiristorului și a comenzii de stingere;

- pentru simularea proceselor tehnologice cu alte medii de tratament decât atmosferele de tip endogaz, sau pentru alt tip de tratament termochimic sub același mediu de lucru, se impune elaborarea altor programe care să țină cont de specificul tehnologic și al mijlurilor de măsură și control.

Necesitatea implementării echipamentelor de calcul pentru conducerea proceselor de tratament termic se justifică în mod deosebit în cazul proceselor duale care implică doi parametri de proces ce trebuiesc controlați și reglați. Efectele acestui mod de procesare tehnologică conduc la asigurarea unui regim optim de tratament, cu consumuri energetice menținute sub control și cu indici de calitate superioari pentru produsele tratate.

Interesul principal al utilizatorilor industriali îl constituie, fără îndoială, posibilitatea realizării unor procesări tehnologice pe baza evoluției reale a parametrului tehnologic în reperul supus tratamentului termic. Pentru a realiza aceste deziderate, la un nivel cât mai performant, se impune constituirea unei structuri de hardware de calitate și realizarea unei software în cele mai severe cerințe tehnologice, precum și existența unui *program*, în faza de pregătire tehnologică pentru identificarea performanțelor cuptorului, modelării de șarje și de simulare a regimului de funcționare a cuptorului în regim de procesare.

## **V.1 UTILIZAREA PROGRAMULUI **TRATERM** PENTRU IDENTIFICAREA ȘI OPTIMIZAREA CONSTRUCTIVĂ A CUPTORULUI.**

### **V.1.1 Identificarea și optimizarea performanțelor termice ale cuptorului**

Prin rularea pas cu pas a subprogramului **MOD\_CUP** pot fi obținute informații privind performanțelor termice ale unui cuptor pe baza datelor constructive și de materiale extrase din documentație așa cum se vede în ecranele captate în timpul rulării programului și prezentate în **Fig.5.1** și **Fig.5.2**.



TRATERM

Programare

Modelare Cuptor

Inaltimea (m) : 0.987  
 Adincimea (m) : 1.580  
 Latimea (m) : 1.310

TRATERM

Programare

Modelare Cuptor

Denumirea cuptorului : CCABU 10 - 6x12x4  
 Temperatura ambianta : 20.00  
 Temperatura nominala a cuptorului : 950.00  
 Continut H2 in atmosfera [%] : 40.00

Programare

Modelare Cuptor

Cuptorul CMTECA - pierderile prin  
 pereti la Tc = 950.00(gr C)  
 Perete lateral stanga : 1.17 (kW)  
 Perete lateral dreapta : 1.17 (kW)  
 Boltia : 1.39 (kW)  
 Usura : 1.86 (kW)  
 Perete spate : 1.76 (kW)  
 Perete fata : 2.06 (kW)  
 Total pierderi prin pereti : 9.41(kW)

Programare

Modelare Cuptor

Perete lateral stanga  
 Rezistenta termica a peretelui : 2.14 (m<sup>2</sup>C/W)  
 Pierderile termice prin perete : 416.68 (W/ep)  
 Caldura acumulata de perete : 41.97 (kJ/ep)  
 Temperaturile straturilor T 1 : 783.88 (gr C)  
 T 2 : 232.08 (gr C)  
 T 3 : 59.67 (gr C)

Exista scuri-circuite termice (DANI)? :  
 Pierderile prin perete (corectie) :416.68 (W/ep)  
 Coeficientul pierderilor prin scurtcircuit : 0.00 [%]

Fig.5.1 Ecrane captate din rularea subprogramului TRATERM\_CUP

Pierderi traversari borne : 0.203 [kW]  
 Pierderi traversari termocuplu : 0.035 [kW]  
 Pierderi traversari axe : 0.048 [kW]  
 Pierderi incalzire atmosfera : 3.560 [kW]  
 Pierderi prin etansare : 4.824 [kW]  
 Pierderi prin deschidere usi : 2.059 [kW]  
 Pierderi totale suplimentare la Tc= 950: 10.769 [kW]  
 Pierderi totale cupior la Tc= 950 : 20.177 [kW]

Funcția pierderilor de putere  
 $P(T) = 0.221426 * [T / 20.00 - 1]$  1.19  
 $Gq(T) = 0.006550 * [T - 20.00]$  0.18  
 $Gqu(T) = 0.000390 * [T - 20.00]$  0.18

Temperatura finala de racire (gr C) : 750.00  
 TEMP 767.88  
 Timp racire 5.50  
 Timpul total de racire 5.500 [ore]  
 Funcția de racire :  
 $T(t) = 20.00 * ( 1 + 0.003193 * 0.510 ) - 5.71 + t (gr C \cdot h)$

Energia acumulata in metal 53.114 [kWh]  
 Energia acumulata in ceramica 36.456 [kWh]  
 Energia acumulata total EAT =565.756 [kWh]  
 Inertia Termica Ith = 0.608 [kWh/gr C]  
 Timp mort echivalent TAUn = 0.167 [min]

Se remarcă următoarele aspecte:

a) datele de intrare specifică tipul de cuptor (cameră), condițiile de testare și dimensiunile spațiului util;

b) pentru fiecare tip de perete izolator termic în parte trebuie specificate următoarele date de intrare: numărul straturilor de izolare constituite din materiale diferite și tipul materialului de izolare. Rezultatele obținute evidențiază rezistența termică a peretelui, valoarea fluxului termic conductiv prin perete, cantitatea de energie termică acumulată la atingerea regimului termic staționar corespunzător temperaturii de testare, precum și temperaturile la interfața între două straturi de izolare din materiale diferite. Dacă temperaturile depășesc valorile maxim admisibile atunci se furnizează un mesaj pentru restructurarea peretelui sau de modificare a tipului de material.

Programul permite ca pentru fiecare perete în parte să se corecteze prin majorare valoarea fluxului termic, proporțional cu mărirea scurtcircuitelor termice raportate la unitatea de suprafață a carcasei metalice exterioare a peretelui;

c) sunt determinate și afișate pierderile termice prin conducția pereților;

d) sunt calculate pas cu pas pierderile suplimentare ale cuptorului; pierderi comune acestuia provocate de elementele constructive (traversări axe de rotor agitator, termocuple, borne și etanșări), precum și de cele de natură tehnologică (introducere atmosferă de tratament, deschideri uși). Aceste pierderi suplimentare sunt adăugate pierderilor totale prin conducția pereților.

Cu aceste pierderi totale ale cuptorului, determinate la regimul termic staționar al cuptorului, pentru 10 temperaturi diferite din domeniul temperaturilor de funcționare în regim normal, sunt generate funcțiile caracteristicii statice a cuptorului (variația pierderilor funcție de temperatură) și funcția de variație a conductanței termice globale a cuptorului în raport cu diferența de temperatură între interiorul și exteriorul peretelui;

e) prin specificarea masei de material metalic și ceramic din structura interioară a incintei de tratament, precum și natura materialelor, sunt determinate acumulările de energie termică ce se adaugă peste cele ale pereților izolatori.

Sunt determinate inerția termică și constantele dinamice ale cuptorului fără șarjă (timp mort, constantele de timp, perioada de oscilație, pulsația naturală și factorul de amortizare);

f) determinarea funcției de variație a temperaturii din interiorul cuptorului în timpul procesului de răcire naturală.

Programul mai permite determinarea timpilor de atingere a regimului termic staționar și al consumului de energie prin conducția fiecărui perete în parte pentru un timp specificat.

În Fig.5.3 sunt prezentate ecrane captate din rularea aceluiași program dar schimbând datele de intrare ca urmare a următoarelor modificări în construcția cuptorului:

- a fost redus numărul traversărilor prin borne de la 12 la 8 prin înlocuirea alimentării rezistoarelor prin transformator trifazat cu transformator Scott (cu intrare trifazată și ieșire bifazată);

- au fost eliminate scurtcircuiturile termice provocate de dopurile portrezistor ce afectează pierderile prin peretele din spate;

- au fost eliminate materialele metalice și ceramice din structura căilor de manipulare șarjă ca urmare a introducerii unui strat din carbură de siliciu pe primul strat de izolare la interior a vetrei.

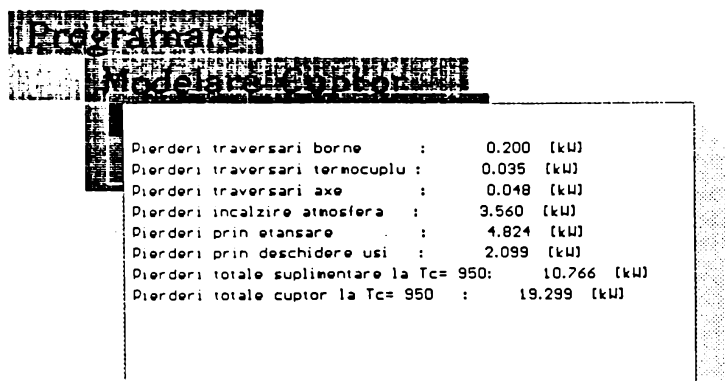
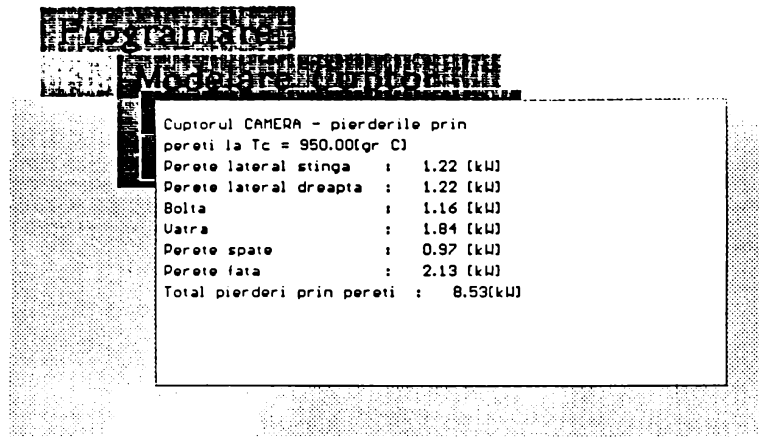
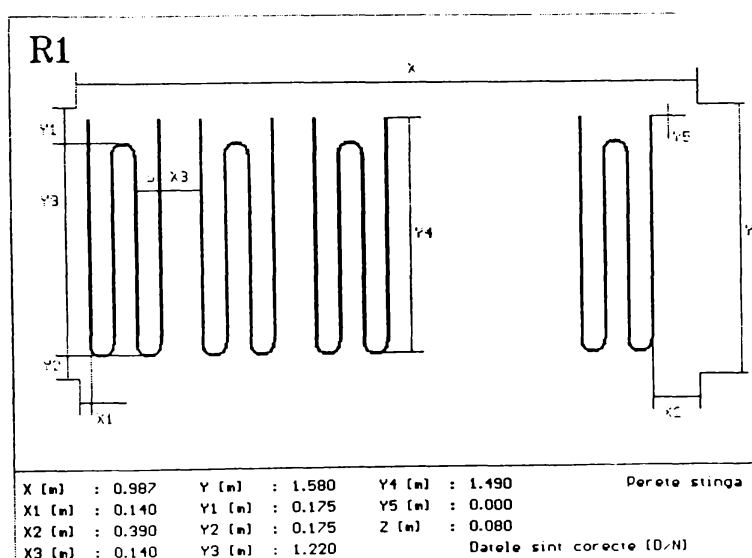


Fig.5.3 Ecrane captate din rulara subprogramului **JUD\_CUP** cu date de intrare modificate față de cele din Fig5.1

Se remarcă reducerea pierderilor prin conducția pereților de la 9,41 kW la 8,64 kW, a pierderilor totale ale cuptorului de la 20,18 kW la 19,3 kW, reducerea energiei consumate prin acumulări de la 596,9 kWh/°C la 565,8 kWh/°C, precum și reducerea inerției termice a cuptorului de la 0,642 kWh/°C la 0,608 kWh/°C.

### V.1.2 Identificarea și optimizarea performanțelor nominale ale instalației de încălzire

Prin rularea pas cu pas a subprogramului **CALC\_REZ** pot fi obținute informații privind caracteristicile electrice și termice nominale ale instalației de încălzire indirectă prin rezistoare pe baza datelor constructive și de materiale extrase din documentație așa cum se vede în ecranele captate în timpul rulării programului și prezentate în Fig.5.4.



Puterea electrica de incalzire 79.74491 (kW)  
 Puterea disponibila de incalzire 53.50791 (kW)  
 Curent electric prin element 984.50505 (A)  
 Densitatea de curent 2.15751 (A/cm<sup>2</sup>)  
 Capacitatea termica a rezistorilor 0.05089 (kWh/gr C)  
 Incarcarea specifica 2.00028 (W/cm<sup>2</sup>)  
 Incarcarea specifica corectata 2.01988 (W/cm<sup>2</sup>)  
 Incarcarea specifica pe perete 20.19881 (kW/mp)  
 Functia de variatie a rezist. electrice

$$R(T) = 0.0115e^{(1+T-20)} + 0.00320 \text{ (ohm/gr C)}$$

Functia de variatie a temperaturii rezistorului

$$T(T) = \sqrt[3]{0.0292968e^{(T+273)}} - 273 \text{ (gr C)}$$

Factor de vedere rezistor-perete 0.44839  
 Factor de vedere rezistor-rezistor 0.05161  
 Cistigul static al cuptorului 11.66219 (gr C/kW)  
 Factor de amplificare cuptor gol 0.08575 (kW/gr C)  
 Banda de proportionalitate 11.66219 (%)

Fig.5.4 Ecrane captate din rularea subprogramului **CALC\_REZ**

Se remarcă următoarele aspecte:

a) datele de intrare ce trebuiesc specificate sunt: tipul de configurare a rezistorului pe perete, tipul de laminat din care se confecționează rezistorul (sârmă, bandă, țevă), tipul materialului metalic, datele geometrice ale elementului rezistor și de amplasare pe perete, caracteristicile geometrice ale elementului rezistor (diametru, lungime activă, lungime și forma bornei), tensiunea nominală și cea reală de alimentare a unui element, numărul de elemente și de borne;

b) se determină puterea nominală și puterea disponibilă pentru încălzirea șarjei ținând cont de pierderile cuptorului;

c) se determină parametrii electrici ai elementului rezistor: curentul nominal, densitatea de curent prin secțiunea materialului, încărcarea specifică pe unitatea de suprafață a rezistorului și corectarea acestei încărcări în raport cu modul de configurare în raport cu peretele cuptorului;

d) se determină caracteristicile termice ale peretelui încălzitor prin: densitatea de putere raportată la unitatea de suprafață a pereților pe care sunt amplasate rezistoarele și funcția de transfer termic prin radiație raportată la unitatea de suprafață a peretelui;

e) se determină funcția de variație a temperaturii rezistorului funcție de temperatura punctului cel mai rece din cuptor (șarja);

f) se determină caracteristicile dinamice ale cuptorului echipat cu instalația respectivă de încălzire (câștigul static al cuptorului, factorul de amplificare și banda de proporționalitate).

În Fig.5.5 este reprezentat ecranul conținând rezultatele identificării parametrilor instalației de încălzire pentru o variantă în care a fost redus pasul între două ramuri învecinate ale rezistorului în scopul îmbunătățirii funcției de transfer termic prin radiație (produsul între suprafața de radiație a rezistorului cu factorul de vedere între rezistor și șarjă).

```

Puterea electrica de incalzire      79.74491 (kW)
Puterea disponibila de incalzire    53.50791 (kW)
Curent electric prin element       984.50505 (A)
Densitatea de curent                2.15751 (A/cm2)
Capacitatea termica a rezistorilor  0.05083 (kJ/kg C)
Incarcarea specifica               2.00028 (W/cm2)
Incarcarea specifica corectata     2.35653 (W/cm2)
Incarcarea specifica pe perete     23.56528 (kW/m2)
Funcția de variație a rezist. electrice

          0.0115611+1E-004*(0.003201+0.000000)

Funcția de variație a temperaturii rezistorului
          0.000000
          0.0074360711*(1+0.0731) = 0.007436 (K/C)

Factor de vedere rezistor-perete    0.43959
Factor de vedere rezistor-rezistor  0.06041
Câștigul static al cuptorului      11.66219 (gr C/kW)
Factor de amplificare cuptor gol   0.08575 (kW/gr C)
Banda de proporționalitate          11.66219 (%)

```

Fig.5.5 Ecran cu rezultatele finale din rularea subprogramului CALC\_RKZ

## V.2 UTILIZAREA PROGRAMULUI ~~TRATEM~~ PENTRU OPTIMIZAREA REGIMULUI DE EXPLOATARE A CUPTORULUI.

### V.2.1 Optimizarea costului cu energia în regim de exploatare cu întreruperi

În exploatarea celor mai multe cuptoare intervin perioade de întrerupere în funcționare cauzate de alimentarea neritmică cu șarje pentru tratament. În aceste situații se impun soluții care să optimizeze costul cu energia pentru perioada de funcționare în gol.

Soluția de întrerupere a funcționării cuptorului este neindicată chiar și pentru perioade de până la 24h din cauza timpilor destul de lungi de repunere în condiții de regim staționar și implicit consumul prin acumulări și prin conducția pereților în acest timp.

Soluția cea mai rațională este de a reduce temperatura din camera cuptorului pe perioada de așteptare la o valoare care să asigure un nivel acceptabil a pierderilor și un timp cât mai scurt de repunere a cuptorului la temperatura de tratament.

În ecranele prezentate în Fig.5.6 și Fig.5.7 sunt reproduse rezultatele unui test realizat cu subprogramul MOD\_CUP pentru simularea a două perioade de întrerupere în funcționare de 8h și respectiv de 4h. În ambele cazuri se remarcă eficiența reducerii temperaturii de menținere a cuptorului gol la o temperatură de 760°C. Consumul de energie pe perioada de menținere și de repunere la temperatura de tratament se reduce în primul caz de peste 2 ori și în al doilea caz cu 80%, față de consumul de energie în cazul menținerii cuptorului la temperatura de tratament.

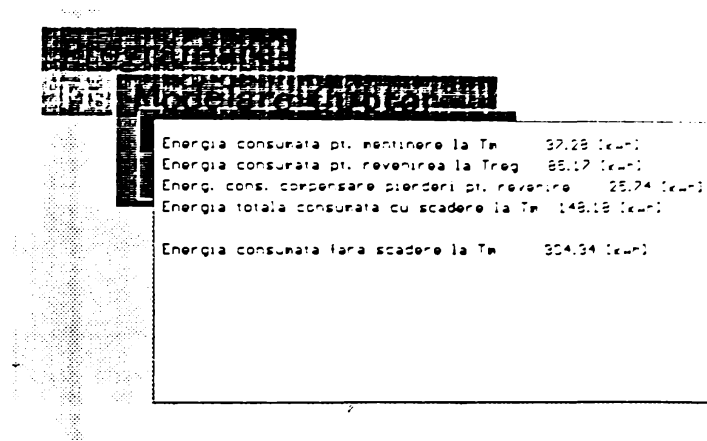


Fig.5.6 Ecran din rulara subprogramului MOD\_CUP cu rezultatele consumului de energie în regim de exploatare de 8 ore

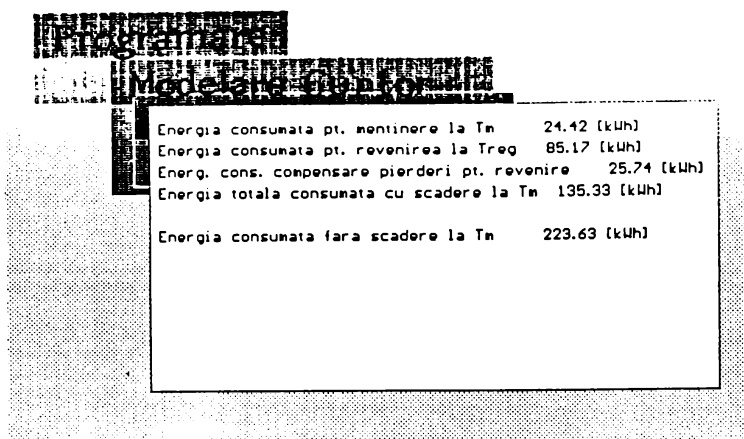


Fig.5.7 Ecran din rularea subprogramului `MOD_CUP` cu rezultatele consumului de energie în regim de aprindere de 4 ore

## V.2.2 Optimizarea regimului de încălzire a șarjei

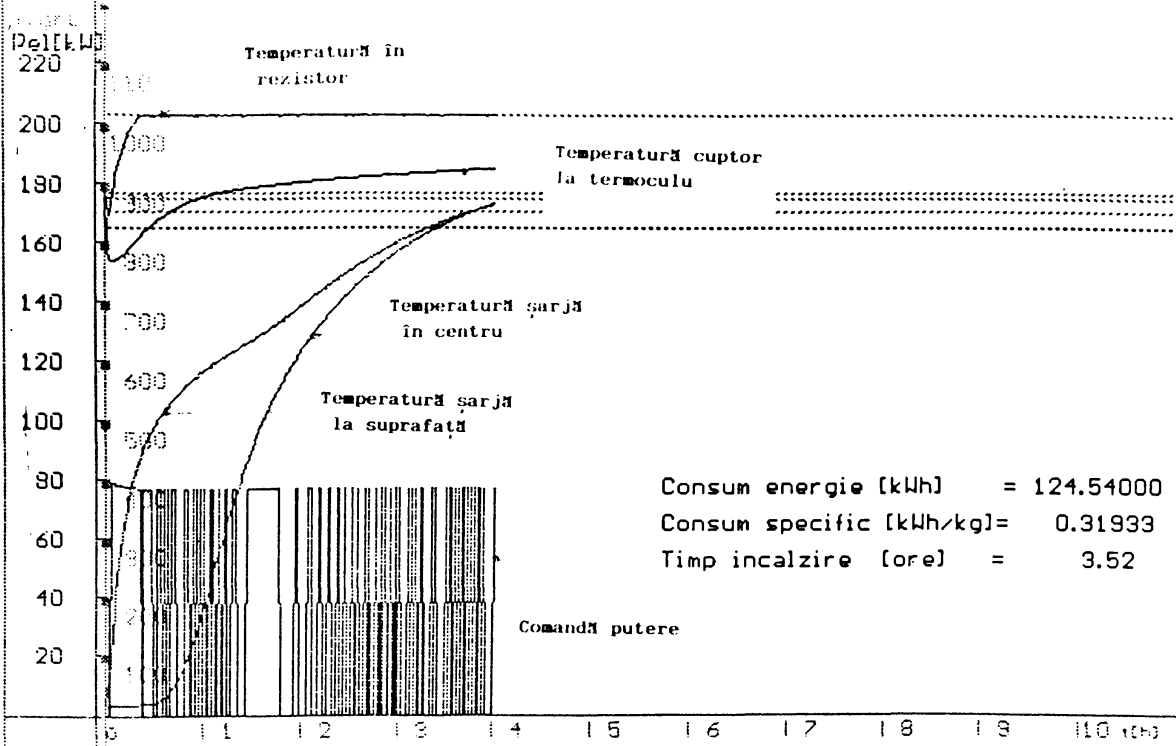
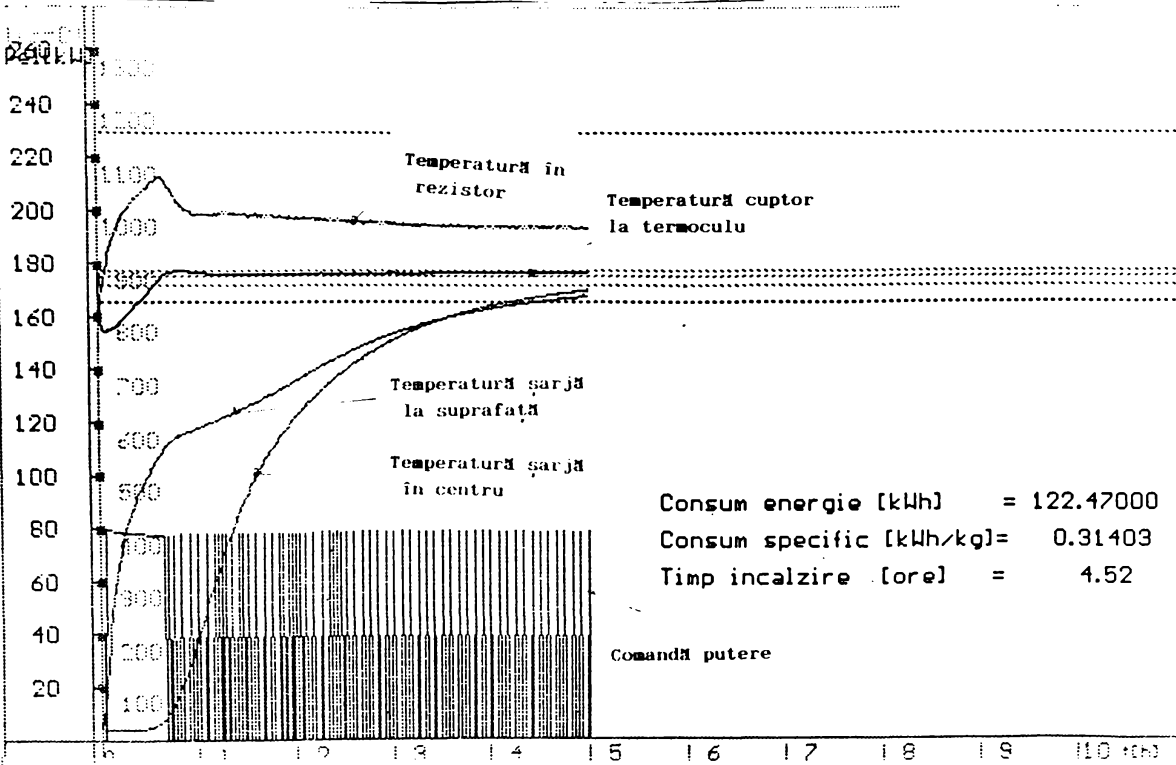
Prin alegerea opțiunii de simulare a procesului de încălzire a șarjei după controlul temperaturii la suprafața șarjei prin rularea subprogramului `SIMUL_TERM`, este posibil ca pe prima perioadă a procesului de încălzire temperatura rezistorilor să fie ridicată până în apropierea temperaturii maxime admisibile de utilizare a acestora și de a procesul de încălzire după evoluția temperaturii la suprafața șarjei. Utilizând acest regim de funcționare densitatea fluxului termic pe suprafața șarjei va căpăta valori importante și ca efect timpul de încălzire pentru această perioadă se va reduce iar productivitatea orară a cuptorului va crește în consecință.

Soluția reprezintă un mod real de optimizare a regimului de funcționare a cuptorului, cu efecte asupra productivității și a consumului specific de energie.

Acceptată tehnologic, această încălzire intensă pe prima fază a ciclului de încălzire impune mijloace și modalități prin automatizare pentru a controla acest proces. Dacă cuptorul este echipat cu rezistori de tip tubular acest lucru se realizează relativ simplu prin introducerea unui termocuplu în interiorul rezistorului. Sunt necesare și în acest caz modificări în buclele de reglare a temperaturii pentru a fi echipate cu aparate reglatoare ce permit o dublă indexare, una pentru temperatura din rezistor și alta pentru temperatura din incinta cuptorului. Cu toate acestea problema reglării în cascadă sau prin supraindexare nu este sigură deoarece trebuie controlat cu precizie și momentul în care trebuie operată schimbarea referinței. Acest mod de funcționare, cu controlul procesului după temperatura din piesă, este posibil de realizat în condiții de siguranță doar prin mijloacele moderne de conducere proces.

În Fig.5.8 se reproduc pentru comparație curbele de încălzire obținute prin simulare în condiții identice privind șarja, cu reglajul puterii după temperatura măsurată la termocuplu și respectiv controlată la suprafața șarjei.





## Diagrama temp.-putere-timp

Fig.5.8 Diagrame obținute prin subprogramul `SIRUI_TESI` cu simularea încălzirii unei sarcini prin regula de reglare a puterii după temperatura la termocuplu și respectiv după temperatura la suprafața sarcii

Se remarcă posibilitatea reducerii duratei perioadei de încălzire a șarjei în întreaga masă în mod uniform cu menținerea consumului specific de energie.

Deși timpul de încălzire se reduce cu aproximativ 0.5h consumul de energie se menține același din cauza creșterii duratei de conectare cu putere medie de 100% în cazul procesării temice după temperatura la suprafața șarjei, regim în care reglajul de putere se realizează după temperatura rezistorului.

### V.2.3 Optimizarea regimului de procesare tehnologică.

#### a) Analiza procesului tehnologic

Atât pentru întocmirea unei structuri adecvate de hardware cât și pentru realizarea structurii de software se impune o analiză inițială a întregului proces tehnologic. Pentru cazul considerat în lucrare trebuie pornit de la analiza diagramei de procesare tehnologică (Fig.5.9).

Sunt necesare evidențierea următoarelor caracteristici specifice procesului real în cazul procesării într-un cuptor cu o singură cameră de tratament:

- șarja se introduce în cuptorul aflat inițial la temperatura de tratament și umplut cu atmosferă controlată de tip endogaz. Temperatura inițială a șarjei este cea a mediului ambiant;

- prin introducerea șarjei reci și prin deschiderea ușii cuptorului temperatura din incintă scade, la o valoare care poate fi determinată prin simulare în programul **TRATEM**. Pentru a reduce riscul formării și depunerii funinginii pe durata de repunere a temperaturii din incintă la o valoare  $> 800^{\circ}\text{C}$  atmosfera din cuptor este menținută săracă în carbon prin întreruperea alimentării cu gaz metan [146];

- viteza de creștere a temperaturii la suprafața șarjei și în centrul ei sunt obținute anticipat prin simulare termică.

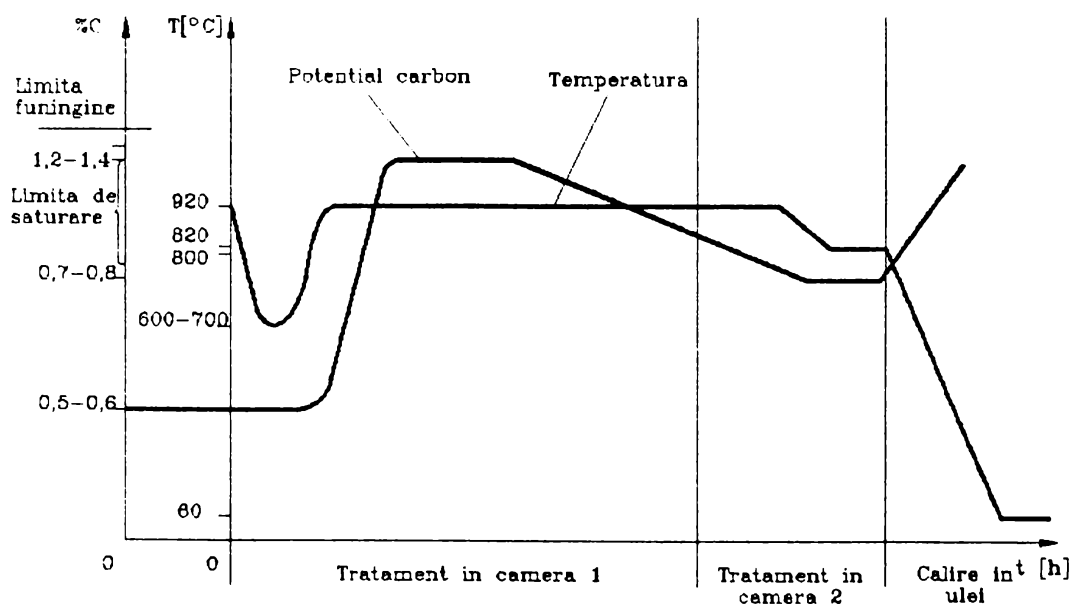


Fig.5.9. Diagrama tehnologică de tratament termochimic de cementare.

Condiția de a exista o distribuție uniformă a temperaturii în întreaga masă a șarjei, în special în cazul șarjelor divizate, reprezintă o condiție obligatorie pentru a obține o calitate în limite acceptabile pentru toate piesele care compun șarja. Acest lucru este absolut necesar deoarece în momentul introducerii gazului metan de îmbogățire în carbon procesul de carburare superficială se lansează automat fiind condiționat de temperatura piesei [50];

- referința pentru potențialul de carbon din cuptor trebuie modificată în timp real [127,146]:

- la începutul procesului controlul potențialului de carbon se realizează funcție de *limita de formare a funingini*;

- pe perioada de transfer la suprafața a masei de carbon limita de control a potențialului de carbon se realizează după *limita maxim admisibilă tehnologic, numită limită de saturare* și care ține cont de factorul de aliere a materialului din care este confecționat reperul;

- pe perioada de difuzie a carbonului în stratul supus carburării, pentru uniformizarea distribuției carbonului în stratul impus tehnologic și care trebuie *controlat prin simulare în timp real*, controlul potențialului de carbon din incinta cuptorului se realizează după *conținutul de carbon final dorit la suprafața piesei*;

- pentru realizarea condițiilor de călire în ulei, după terminarea fazei de difuzie, se impune o reducere a temperaturii șarjei la *temperatura de călire (800°C)*. Pe durata acestei faze potențialul de carbon trebuie controlat după o referință ce trebuie corectată în timp real după valoarea temperaturii gazelor.

#### b) Analiza structurii de hardware

Se recomandă o *structură distribuită* în care calculatorul deține rolul de supervisor și de generare *off-line* a diagramelor de tratament, urmând ca rolul preluării și conducerii efective să fie asigurat de un controler de proces conectat serial cu calculatorul și echipat cu memorie internă de stocare a programului preluat și de a conține un soft propriu pe baza căruia să execute funcții de identificare și acordare adaptivă a parametrilor funcției de reglare (Fig.5.10) [38,40].

Această structură de hardware prezintă următoarele avantaje tehnico-economice:

1°) aparatul de tip controler programabil, pentru mai mulți parametrii de proces controlați și reglați, încorporează funcțiile de reglare a parametrilor tehnologici de proces într-un singur aparat, suprimă necesarul de interfețe specializate pentru conectarea la proces, poate fi programat și local independent prin comunicare serială cu un calculator de supervizare și furnizând direct comanda către elementele de execuție;

2°) sunt reduse efectele perturbațiilor asupra semnalelor furnizate spre proces sau achiziționate din proces prin *utilizarea transmisiei în curent*. În acest scop pentru semnalele de la termocuple ssunt prevăzute convertoare **mV/mA**, montate local în capul termocoplului și care realizează atât conversia cât și funcția de linearizare a semnalului provenit din proces;

3°) fiabilitatea structurii este sensibil îmbunătățită prin limitarea numărului de aparate și prin caracterul flexibil în exploatare, dat prin posibilitatea de a continua un ciclu de tratament în derulare chiar dacă comunicarea cu calculatorul nu mai este posibilă din diferite motive;

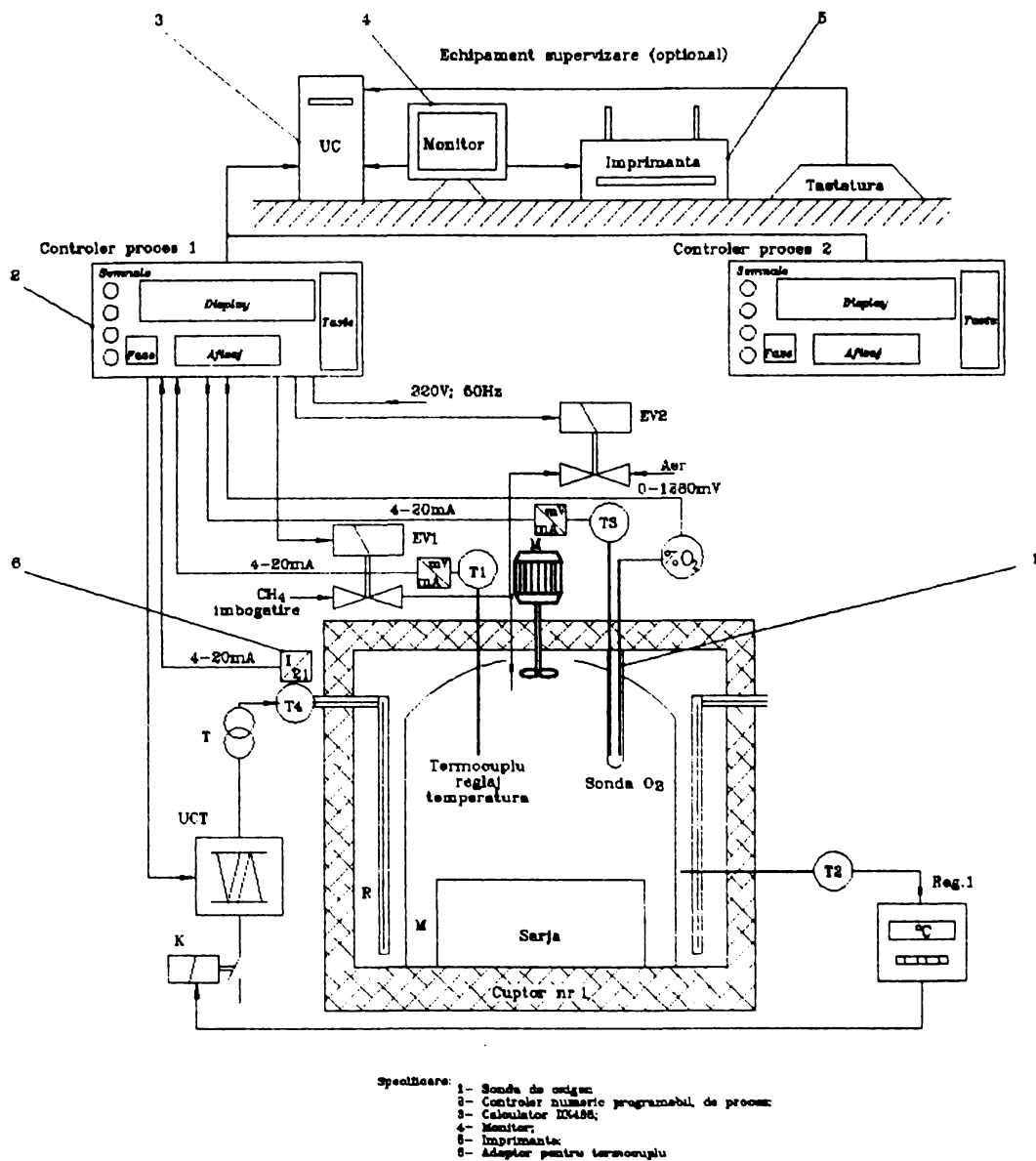


Fig.5.3 Schema de conducere proces in structura distribuita

### c) Analiza structurii de software

Structura de software asigura o procesare tehnologica optima deoarece:

- diagramele de procesare tehnologica sunt furnizate on-line pe baza rezultatelor unei simulări off-line a derulării procesului în șarja de tratat;
- simularea procesului în șarjă se realizează în condițiile de mediu din incinta de tratament achiziționate din proces prin senzorul specific parametrului controlat și reglat;
- dozarea puterii electrice injectate în rezistoare și a debitului de fluid tehnologic se realizează continuu adaptiv;
- terminarea procesării tehnologice este dictată de realizarea parametrilor tehnologici finali realizați în produsul de tratat.

## **CAP. VI CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚIILE PRINCIPALE ALE LUCRĂRII**

### **VI.1 CONCLUZII GENERALE**

Obiectivele lucrării urmăresc stabilirea unor soluții constructive și funcționale în scopul optimizării performanțelor termice globale și a regimurilor funcționale a cuptoarelor electrice industriale cu încălzire indirectă prin rezistoare, destinate tratamentelor termice și termochimice la temperaturi ridicate pentru șarje constituite din reperi tehnologici metalice divizate și de structură omogenă. Reperele sunt distribuite ordonat pe dispozitive special realizate pentru un anumit reper sau distribuite dezordonat în coșuri (în vrac). Șarjele astfel constituite sunt amplasate în incinta cuptorului în diferite moduri de configurare și într-o poziție stabilă pe vatra cuptorului pe întreaga durată a procesului de tratament. Operațiile de șarjare-deșarjare se realizează la cald în regim discontinuu.

În vederea soluționării obiectivelor propuse se impune o abordare complexă a întregului ansamblu constructiv și fenomenologic implicat în desfășurarea unui proces tehnologic de tratament termic.

Cuptoarele electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare, cu regim de funcționare discontinuu, reprezintă categoria echipamentelor electrotermice cu cea mai mare reprezentare în sectorul producției industriale. Utilizarea cea mai importantă a acestor tipuri de cuptoare o reprezintă tratamentul termochimic realizat în atmosfere tehnologice de tratament, fapt ce implică controlul și reglarea a doi parametri distincți în proces, temperatura și respectiv conținutul unei anumite componente din amestecul de gaze din incinta de tratament.

Pentru obținerea unor regimuri optime de funcționare, atât în privința consumurilor de energie electrică sau de fluide tehnologice, contorizate pe durata unui ciclu tehnologic de tratament termic, cât și în privința realizării unei calități garantate cu anticipare și reproductibile de la un ciclu la altul asupra reperelor supuse procesării, se impune cu necesitate asigurarea unor performanțe maxime ale cuptorului.

În lucrare sunt evidențiate o serie de soluții tehnice ce conduc prin aplicare la îmbunătățirea substanțială a performanțelor termice și energetice ale cuptoarelor electrice. Dintre soluțiile implementate și validate care a constituit un succes semnificativ se evidențiază înlocuirea izolației termice a incintei cuptorului, din cea realizată prin cărămizi refractare cu cea realizată din fibre ceramice cu inerție termică redusă. Soluția are un dublu efect energetic: consumul de energie prin acumulări pe durata stabilizării se reduce cu 5-8 ori, iar timpul de atingere a temperaturii de funcționare se reduce fapt ce conduce la reducerea consumului de energie electrică pe ciclu de tratament cu peste 50%. Importanța energetică a izolației în optimizarea consumurilor s-a dovedit atât de necesară încât în multe cazuri se justifică utilizarea unor materiale de izolare a căror cost poate depăși 80% din costul întregului echipament.

O soluție tehnică evidențiată în lucrare care conduce la creșterea productivității cuptorului electric cu încălzire indirectă prin rezistoare cu temperaturi ridicate, o reprezintă creșterea densității de putere de la 15-20 kW/m<sup>2</sup> la 30-80 kW/m<sup>2</sup> raportat la unitatea de suprafață a peretelui încălzitor,

utilizând rezistoare metalice masive de tip tubular și alimentate la tensiune redusă. Eficiența transferului termic prin radiație se obține atât prin creșterea suprafeței de radiație a peretelui încălzitor cât și prin creșterea temperaturii de utilizare în prima fază a ciclului de încălzire când șarja nu a atins temperatura de tratament. Efectele de natură productivă și energetică decurg din reducerea timpilor de încălzire a șarjei. Utilizarea rezistorilor de tip tubular rezolvă și o problemă deosebit de acută privind duranța materialelor metalice rezistive care sunt expuse direct unui proces de carburare în cazul utilizării lor în atmosfere cu acțiune chimică, precum și utilizarea de materiale rezistive cu componente de aliere deficitare mult reduse (Ni cu 50%). Ambele deziderate au fost validate atât prin testări funcționale. Duranța devine de 6-10 ori mai mare decât în cazul tuburilor radiante utilizate până în prezent.

Îmbunătățirile constructive aplicate cuptoarelor electrice cu rezistoare au conferit acestor echipamente caracteristici superioare, din care reducerea inerției termice este cea mai importantă.

Obținerea unor performanțe maxime nu poate fi realizată apelând în exclusivitate la soluții constructive. Oricât de superioare ar fi performanțele nominale ale unui cuptor ele nu pot fi valorificate în exploatarea curentă fără o utilizare în regimuri optime de procesare. Întucât mijloacele actuale de măsurare a parametrilor tehnologici implicați în procesele realizate în cuptoare electrice cu rezistoare nu permit obținerea de informații decât a mărimilor determinate prin senzori într-un punct din incinta de tratament, informațiile privind evoluția și distribuția în timp a parametrilor de proces din șarjă constituie necunoscute care nu pot fi obținute prin măsurători directe. Din aceste motive procesările actuale sunt realizate pe baza unor rețete tehnologice determinate empiric, eventual prin probe pe o șarjă nominală cu anumite caracteristici.

Operațiile tehnologice de tratament termic sunt în multe cazuri operațiile finale asupra unui produs industrial. Acest fapt conferă o importanță deosebită acestei faze tehnologice asupra unui produs. Utilizarea mijloacelor informaționale, atât în faza de pregătire tehnologică cât și pentru conducerea programată a proceselor pot constitui o soluționare cu efecte deosebite deoarece prin utilizarea acestor tehnici este posibil de a determina și realiza procesări tehnologice în regimuri optime atât productiv, energetic, cât și calitativ tehnologic.

Procesarea calitativă necesită existența unor echipamente de reglare cu performanțe deosebite, capabile de a conduce procesul de reglare după funcții adaptiv-optimale pe întreaga durată a ciclului de procesare.

Lucrarea prezintă un pachet de programe destinate optimizării regimurilor de procesare termică și termochimică prin modelarea numerică a unui proces complex de tratament, ce pot fi implementate în structuri de hardware și software destinate procesărilor tehnologice realizate în cuptoare electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare.

Programul principal denumit **TRATEEM**, structurat pe module ce pot rula independent, este destinat identificării performanțelor termice ale cuptoarelor electrice și optimizării ciclurilor de procesare termică. Primul modul permite identificarea tuturor parametrilor statici și dinamici ai unui cuptor iar al doilea modul permite determinarea caracteristicilor nominale ale instalației rezistive de încălzire. Elementele de generare a modelelor de cuptor și ale instalației de încălzire le reprezintă datele constructive extrase din documentația de execuție. Modelele create păstrează în întregime configurația cuptorului real și ale

instalației de încălzire. Prin rularea celor două module se obțin datele necesare privind comportarea în regim staționar și în regim tranzitoriu al ansamblului cuptor-rezistoare. Aceste elemente sunt necesare în determinarea condițiilor de mediu în care urmează a se desfășura un proces termic de încălzire sau răcire, precum și a funcțiilor de variație cu temperatura în regim tranzitoriu a principalilor parametri termici ai cuptorului și a elementelor rezistive de încălzire. Aceste module pot fi utilizate în activitatea de cercetare constructivă oferind posibilități de optimizare constructivă atât pentru izolarea termică a cuptorului cât și pentru optimizarea instalației de încălzire.

Pentru a răspunde obiectivelor principale ale lucrării și pentru a nu încărca excesiv programul principal, subprogramele de modelare cuptor limitează tipurile de cuptoare la cele cu incintă paralelipipedică sau cilindric verticale, cele mai frecvente în exploatare și pentru care se manifestată interes și în prezent.

Modulul destinat modelării șarjelor supuse tratamentului termic prezintă unele elemente de particularitate. Aceste elemente de particularitate pot fi considerate justificate și acceptabile datorită numărului practic de nespecificat altipuri de repere ce pot fi supuse tratamentelor termice realizate în cuptoarele electrice. Alegerea tipului de șarjă se justifică prin caracterul predominant în producția industrială a reperelor de tip mărunț. Majoritatea șarjelor sunt constituite din piese divizate a căror dispunere în cuptor se realizează prin dispozitive de susținere a lor. Dispunerea pe acest dispozitiv de susținere este fie dezordonat (în vrac), fie în cazuri mai rare ordonat. Caracteristica termică principală a majorității reperelor este de piese termic subțiri. Șarjele conțin pe lângă masa netă a pieselor de tratat și o masă suplimentară introdusă de dispozitivele de susținere piese și de suportii de manipulare a șarjei, care poate constitui până la 70% din masa șarjei brute. Subprogramul de modelare șarjă realizează modele de șarje distribuite în vrac sau ordonat pe baza unor criterii de similitudine cu șarja brută reală utilizând ca date de modelare caracteristicile șarjei reale și datele geometrice și de material pentru reperul tehnologic din compunerea șarjei.

Modulul final al programului permite realizarea simulării procesării termice a șarjei model în cuptorul a căror parametri termici au fost determinați prin rularea subprogramelor din amonte. Acest subprogram de simulare oferă posibilitatea testării diferitelor variante de procesare tehnologică în scopul determinării regimului optim realizat ulterior în cuptorul real cu șarjă reală. Regimurile de procesare pot include condiții și restricții de natură tehnologică. În scopul utilizării diagramelor, obținute prin simulare, ca sursă program pentru conducerea numerică prin echipament de conducere proces, programul de simulare conține și funcții de reglare adaptivă a parametrilor implicați în proces, precum și funcții de comandă gradual-continuă a puterii electrice injectate în elementele rezistive de încălzire.

Pachetul de programe conține un program separat destinat simulării și conducerii prin algoritm de optimizare a procesului de tratament termochimic de cementare în mediu gazos pentru repere metalice din oțeluri aliate. Programul, denumit **SIMUL\_CARB**, utilizează în faza de programare a ciclului de tratament datele obținute prin simularea procesării termice a șarjei cu programul **TRATEERM**. Rularea acestui program permite determinarea influenței pe care o exercită suprapunerea unui proces de transfer de masă peste procesul termic asupra duratei și consumului energetic necesar procesării în scopuri tehnologice reale.

Cele două programe prezentate anterior pot fi utilizate în fazele de pregătire tehnologică pentru testarea regimurilor de procesare pentru diferite tipuri de șarje și pentru diferite moduri de configurare a acestora, respectiv pentru determinarea cu anticipare ciclurilor optime de procesare tehnologică sub aspect productiv, al consumurilor de energie și de fluide tehnologice și al realizării unui tratament de calitate. Pe baza acestora se pot efectua procesări fie prin mijloacele de automatizare din dotarea cuptorului fie prin echipamente de conducere proces.

Realizarea unei conduceri numerice *on-line* a întregului proces într-un cuptor pe baza unei diagrame de proces generată *off-line* pe un calculator prin simulare necesită existența unor echipamente de automatizare înzestrate cu programe proprii destinate identificării și adaptării adaptivă a parametrilor funcției de reglare a puterii. Din acest considerent în lucrare este prezentat un program specific, denumit **ADAPT\_T**, destinat identificării și autoacordării parametrilor unei funcții de reglare adaptivă PID utilizat în subprogramul de simularea procesului de încălzire.

Rezultatele obținute prin simulare au fost supuse testelor de validare prin probe și măsurători pe cuptorul industrial considerat ca model și pentru trei tipuri diferite de șarje divizate distribuite în vrac. Analiza comparativă a rezultatelor confirmă criteriile adoptate în modelarea acestor tipuri de șarje precum și corectitudinea algoritmilor de programare.

Sunt posibile dezvoltări în perspectivă atât a suprogramelelor pe părți cât și a pachetului de programe. Astfel programul de modelare șarje va trebui diversificat funcție de fiecare aplicație în parte.

## VI.2. CONTRIBUȚIILE PRINCIPALE ALE LUCRĂRII

În lucrare sunt evidențiate o serie de elemente care pot fi considerate contribuții originale privind optimizarea constructiv-funcțională a cuptoarelor electrice industriale cu încălzire indirectă prin rezistoare. Aceste contribuții vor fi specificate pe domenii:

1\*) În domeniul îmbunătățirii performanțelor termice funcționale ale cuptoarelor electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare:

a) soluționarea prin cercetare a principiilor teoretice și a tehnicii de utilizare a elementelor de încălzire de tip tubular în scopul creșterii densității de putere cu 2-3 ori pe aceeași suprafață de perete al unui cuptor existent;

b) soluționarea prin cercetare și testări experimentale a principiilor teoretice și a tehnicii de creștere de 6-10 ori a duratei de viață a rezistorilor metalici care sunt expuși în funcționare unui proces de modificare a structurii metalului prin carburare. Soluția actuală prezintă avantaje și de natură economică fiind mult mai ieftină, datorită consumului redus de componente energofage (suportii rezistori din ceramică superaluminioasă) și prin utilizarea de materiale cu conținut redus de elemente de aliere deficitare (Ni, Cr în mantaua tubului refractar protector);

c) soluționarea alimentării optime a elementelor încălzitoare prin transformatoare cu ieșire bifazată (tip Scott), soluție care conduce la reducerea pierderilor cuptorului prin traversări cu peste 50%, prin căile de alimentare la



bornele rezistoarelor și a consumului de materiale pentru realizarea conexiunilor de alimentare a rezistoarelor cu 30%;

d) realizarea unui aparat prototip în concepție originală pentru conducerea numerică a proceselor de tratament termic ce implică mai mult de un parametru ce trebuie controlat și reglat. Aparatul denumit controler este un aparat echipat cu microprocesor, cu funcții de programare locală sau prin teletransmisie de la un calculator cu care se află în conexiune serială, precum și soft propriu de identificare a parametrilor funcției de reglare și de autoacordare adaptivă;

**2°) În domeniul tratării teoretice a problemelor de transfer termic și de masă în cuptoare electrice cu rezistoare**

e) dezvoltarea unui concept de identificare a parametrilor statici ai cuptorului care permite extrapolarea mărimilor determinate în regim staționar pentru un domeniu care acoperă plaja temperaturilor normale de utilizare. Au fost generate funcții de variație în regim tranzitoriu a pierderilor totale ale cuptorului și a conductanței termice globale utilizate în simulările proceselor termice;

f) dezvoltarea unei proceduri de identificare a parametrilor dinamici ai cuptorului gol și de generare a curbei indiciale a cuptorului prin aproximarea ansamblului cuptor-rezistoare-șarjă ca sisteme automate de ordinul 2;

g) realizarea unei analize de optimizare pentru minimizarea pierderilor și a cheltuielilor cu energia electrică pentru perioade scurte de timp în care cuptorul rămâne fără șarjă la tratament o anumită perioadă de timp;

h) dezvoltarea unei metode neconvenționale de tratare a transferului termic prin radiație ținând cont de schimbul simultan între mai mult de două suprafețe cum este cazul cuptoarelor electrice cu rezistoare și pentru tipuri de șarje constituite din reperi considerate termic subțiri;

i) dezvoltarea unei proceduri de determinare a factorilor de vedere geometrice între suprafețe cu forme și orientări spațiale diferite utilizând tehnici de cuadratură combinată cu tehnici de extrapolare pentru creșterea preciziei de aproximare ceea ce constituie un instrument deosebit de util în determinarea cu precizie și optimizării funcțiilor de transfer termic prin radiație;

j) dezvoltarea unor criterii de similitudine în vederea modelării termice a șarjelor constituite din piese divizate și distribuite dezordonat în vrac generat pe baza datelor geometrice, de configurare, termice și de material cu cele ale șarjei reale;

k) dezvoltarea unui algoritm original de identificare a parametrilor funcției de reglare a temperaturii pe baza datelor achiziționate din proces, de autoacordarea acestor parametrii, inițial și pe durata derulării procesului ori de câte ori sunt sesizate perturbații în sistem și care impun o reacordare adaptivă în raport cu durata și amplitudinea perturbației;

l) dezvoltarea unei proceduri de comandă gradual-continuu a puterii injectate în rezistoare prin reglarea timpului de conducție a tiristorilor unui contactor static care funcționează prin reglarea lungimii trenului de unde întregi;

m) dezvoltarea unei proceduri de optimizare a duratei timpului de procesare termică și al transferului de masă prin conducerea proceselor în fază inițială după evoluția parametrului tehnologic în piesa de tratat;

### 3°) În domeniul informatizării proceselor

n) elaborarea și validarea experimentală a unui program integrat pentru determinarea cu anticipare prin simulare a proceselor termice de încălzire și răcire în cuptoare electrice cu încălzire indirectă prin rezistoare cu funcționare la temperaturi ridicate. Programul este utilizabil în activitatea de proiectare și cercetare pentru investigarea soluțiilor constructive și funcționale a cuptoarelor, însă destinația lui principală este de deservire în pregătirea tehnologică pentru determinarea regimurilor optime de procesare;

o) elaborarea și validarea experimentală a unei structuri complete de hard și softul aferent conducerii numerice a proceselor de tratament complex care implică controlul și reglarea a doi parametrii distincți de proces. Structura de hard se distinge prin simplitate, costuri reduse cu investiția și flexibilitatea în exploatare. Controlerul de proces realizează conducerea propriu-zisă a utilajului, fiind programat fie local prin propriul program de comunicare, fie prin teletransmisie de la un calculator de supervizare;

p) elaborarea și validarea experimentală a unui program pentru conducerea autoadaptivă a proceselor de tratament în scopul realizării unor consumuri energetice reduse la minimum necesar, respectiv la funcționarea cuptorului la limita inerției termice a ansamblului cuptor-șarjă pe durata derulării procesului;

r) elaborarea unei structuri de software destinat conducerii programate a unui proces complex de tratament termochimic pe principiul optimizării duratei ciclului de procesare tehnologică și a consumurilor energetice și de fluide tehnologice.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Altgauzen, A.P, ș.a, Instalații electrice industriale (Editura Tehnică, București-traducere din limba rusă, 1977);
- [2] Ambirajan A, Accurate determination of diffuser view, *Heat and Mass Transfer* Nr.4/1993;
- [3] Ambirajan A., Accurate determination of diffuse view factors between planar surfaces, *Heat and Mass Transfer* Nr.8/1993;
- [4] Anita S., A problem of measurement of temperature solve using the one-dimensional heat equation, *Heat and Mass Transfer* Nr.4/1992;
- [5] Bao Ke Do, Transverse conductivity in non-ideal fiber composite geometries, *Heat and Mass Transfer* Nr.16/1993;
- [6] Bao Ke Do, Transverse conductivity in non-ideal fiber composite materials, *Heat and Mass Transfer* Nr.16/1992;
- [7] Barbat G., Hard și soft în automatizarea operațiilor de tratament termic, *Industrial Heating* nr.7/1986;
- [8] Baum V., Dynamical mechanisms of the temperature differences arising under uniform heat exchange conditions, *Heat and Mass Transfer* Nr11/1992;
- [9] Beck I.V., ș.a., Heat Conduction using Green's functions, Riverdale 1992;
- [10] Beu T, Analiză numerică în Turbo Pascal, *Microinformatica*, București, 1992;
- [11] Blom H. ș.a., Développements récents du chauffage par résistances dans les fours industriels, *Electrotech '92 Montreal* 1992;
- [12] Bost Michael, Les fours industriels à résistances électriques. Conception, choix et utilisation, *Electra Dopée'85*, Paris, 1991;
- [13] Bothe K., Numerical method in finite elements analyses, *Pretting Halls Inc.* 1977;
- [14] Boulet P., Model of radiative transfer in fibrous media-matrix method, *Heat and Mass Transfer* Nr.18/1993;
- [15] Bourgeois J.F., Chauffage par résistances et regulation, *EDF-DER* 1993;
- [16] Bourouga B., Mésures de résistances thermique superficielle et de contact au moyens de la constant de temps fondamentale, *Heat and Mass Transfer* Nr.2/1992;
- [17] Brunklaus I.H., Cuptoare industriale, Editura Tehnică, București-traducere din limba germană, 1977;
- [18] Burakovski T., Tendances du développement du traitement thermique, *Revue de Traitement Thermique* nr.240/1990;
- [19] Carnaham B., Applied numerical method, *University of Michigan* 1991;
- [20] CCE, Electrotechnologies. Recueil de Termes, *Canadian Comitee en Electrotechnologies*, Montreal, 1992;
- [21] Cergey M.I., Computerized Properties Prediction and Technology Planning in Heat Treatment of steels, *ASM-Heat Treatment* 1993;
- [22] Charn-Yung Kim, An efficient computational technique to solve the moving boundary problems in the axisymmetric geometries, *Heat and Mass Transfer* Nr.15/1993;
- [23] Chicot D., Cementation.Principes, *ASM-Heat Treatment* 1993;

- [24] Ching Yang Wu, Radiative transfer in a two layer medium on a cylinder, *Heat and Mass transfer* Nr.5/1993;
- [25] Chiriac F., Procese de transfer de căldură și de masă în instalații industriale, Editura Tehnică, București, 1982;
- [26] Comșa D., Electrotermie, Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1979;
- [27] Cornwell, The flow of heat in SI units, Nostrand Reinhold Company 1977;
- [28] Deschamps G., Application des resistances tubulaires dans les fours "batch" de traitement thermique sous atmosphère, EDF 1992;
- [29] Domke K., The optimisation method in solving the problem of the radiative and convective heat exchange, *Seminar-Heat Transfer in Electroheat*, Lodz 1991;
- [30] Dion J.L., Simulation of one-dimensional heat-transfer with variable heat sources using the electric circuit analogy, *Seminar-Heat Transfer in Electroheat*, Lodz 1991;
- [31] Du G Z G, Coupling of wall conduction with natural convection in a rectangular enclosure, *Heat and Mass Transfer* Nr.8/1992;
- [32] Dulămiță T., ș.a., Conduite par les ordinateurs des processus technologiques des traitements thermiques dans les fours electriques discontinous à résistors, ICEH '91 Sibiu 1991;
- [33] Dulămiță T., ș.a., L'optimisation des processus technologiques de traitements thermiques dans les fours electriques discontinous à résistors, ICEH '91 Sibiu 1991;
- [34] Edenhofer B., La flexibilité en traitement thermique grâce aux méthodes modernes de contrôle, *Revue de Traitement Thermique* Nr.241/1991;
- [35] Emmerich V., Rechnerersatz fur energiesparand Keramikbennöfen, *Gaswärme* Nr.40/1991;
- [36] Essen R.F., Nouveau concept d'exploitation flexible d'une ligne de cémentation gazeuse, *Revue de Traitement Thermique*, Nr.136/1990;
- [37] Falinower G.M., Introducere în comanda adaptivă, EDF 1987;
- [38] Falotă H., Comșa H., Analiză de proces pentru conducerea autoadaptivă prin servocontroler, *Contract MCT* 1995;
- [39] Falotă H., Tulai V., Program de reglare autoadaptiv optimală a parametrilor de proces, *Contract MCT* 1995;
- [40] Falotă H., Structuri distribuite de conducere proces prin microcontroler programabil cu teletransmisie, *Contract MCT* 1996;
- [41] Falotă H., Iosof T., Conducerea proceselor de tratament termic în structură descentralizată prin reglare autoadaptiv-optimală a parametrilor de proces, *Simpozion Internațional de Electrotermie*, Slatina 1995;
- [42] Falotă H., Goga O., Optimizarea tehnologică și energetică a ciclurilor de tratament prin simularea proceselor în condiții reale de exploatare a cuptoarelor electrice industriale, *Simpozion Internațional de Electrotermie*, Slatina 1995;
- [43] Falotă H., Dima I., Utilizarea încălzitorilor tubulari în cuptoare cu atmosferă controlată, *Contract MIS* 1991;

- [44] Falotă H., Nițu G., Testare și determinarea performanțelor energetice și tehnologice ale cuptoarelor electrice industriale pe bază de soft, Program **PERFOCUP**, Contract MCT 1994;
- [45] Falotă H., Nițu G., Modelarea termică a diferitelor tipuri de șarjă, Program **TRATERM**, Contract MCT 1994;
- [46] Falotă H., Iosof T., Program **CARBONIT'93** de conducere proces de carburare gazoasă în vederea tratamentului termic de călire a pieselor mărunte distribuite în vrac, Contract MCT 1993;
- [47] Falotă H., Bera L., Program **SIMULCUP** de simulare funcționare în gol a unui cuptor cu încălzire electrică, Contract MCT 1993;
- [48] Falotă H. și Szentghiorghy V., Îmbunătățirea performanțelor energetice și funcționale prin conducerea pe criterii optime și adaptivă a cuptoarelor electrice industriale, Contract MCT 1993;
- [49] Falotă H., Dima I., Utilizarea încălzitorilor tubulari cu funcțiuni duble de încălzire și răcire forțată în cuptoare electrice industriale, Contract MCT 1994;
- [50] Falotă H., Simularea și conducerea prin calculator a tratamentului termic în atmosferă controlată, Conf. Națională de Electrotermie Slatina 1994;
- [51] Falotă H., Iosof T., Creșterea eficienței energetice și tehnologice prin exploatarea cuptoarelor pe baza unor curbe optimizate prin simulare pe calculator, Conf. Națională de Electrotermie, Slatina 1994;
- [52] Falotă H., Stadiul actual privind proiectarea și testarea cuptoarelor electrice cu rezistori cu încălzire indirectă, Referat nr.1 - doctorat/1993;
- [53] Falotă H., Tulai V., Program de comunicații seriale între calculator și controler programabil de proces, Contract MCT 1996;
- [54] Fengshan Liu, The boundary condition of the P<sub>n</sub>-approximation used to solve the radiative transfer equation, Heat and Mass Transfer Nr.8/1992;
- [55] Flament B., Synthèse modele: une méthode de sous-structuration des systèmes thermique linéaires, Heat and Mass Transfer Nr.6/1993;
- [56] Falotă H., Program de optimizare on-line a procesului de carburare gazoasă **SIMUL\_CARB**, Contract MCT 1995;
- [57] Florian E., Modelarea matematică a echilibrului termodinamic realizat în interfața gaz-metal la carburarea oțelurilor nealiate aliate, în atmosfere controlate, Conferința Națională de tratamente termice, Cluj-Napoca 1994;
- [58] Firețeanu V., Procesarea materialelor, CRE, București 1994;
- [59] Fengshan, Liu, The boundary condition of the P<sub>1</sub> approximation used to solve the radiation transfer equation, Heat and Mass Transfer nr.6/1992;
- [60] Foucard M, ș.a., La comande optimale, un outil de conception de strategies de regulation, EDF-DER 1993;
- [61] Fitzker B., Computational model for resistances furnaces, Electrowärme Nr.48/1990;
- [62] Garnearek Z., Degree of heterogeneity of thermal a method of evaluation, Heat and Mass Transfer Nr.11/1992;
- [63] Gârbea D., Analiză cu elemente finite, Ed.Facla, Timișoara 1986;
- [64] Gheysens R., Enseignement de l'électrotermie. Recueil d'exercices et de projets. Enoncés et solutions, Electra-Dopée'85, Paris 1988;

- [65] Ghergely M., Computerized Properties Prediction and Technology Planning in Heat Treatment of Steel, **ASM-Heat Treatment 1993**;
- [66] Goldffarb E.M., Calculul cuptoarelor de încălzire, Ed.Tehnică, București 1990;
- [67] Golebiowski J., Transfer function for analysis of temperature field, **Heat and Mass Transfer Nr.6/1993**;
- [68] Gray W.A., Heat transfer from flames, **ES London-SUA 1976**;
- [69] Grambaryan, T., Influence of segregation-diffusion processus on the effective thermal conductivity of porous ceramics, **Heat and Mass Transfer nr.17/1993**;
- [70] Grassel D., Theoretische grundlage und anlagetechnische vordussetzungen das gasaufkohens, **Aichelin W20/2 1978**;
- [71] Grauss I.M., Les applications de l'électricité et la corrosion. Preccusionsd'emploi des metaux et des alliages inoxydables et refractaires, **EDF-DER 1993**;
- [72] Gurdy D., Considerații în interfațarea calculatorului pentru tratamentul termic, **Industrial Heating nr.7/1986**;
- [73] Hassani V.A., A close upper bound for the conduction shape factor of a uniform thickness 2D layer, **Heat and Mass Transfer Nr.12/1993**;
- [74] Henry Monique ș.a., Enseignement de l'electrotermie. Exercices d'electrotermie issus de projects industriels. Enoncés et solutions à l'usage de l'industrie et de l'Enseignement, **Electra-Dopée'85 1991**;
- [75] Holman I.P., Heat Transfer , **McGraw-Hill Book Company 1980**;
- [76] Jana S., Inter-critical heat treatment, **Materials Processing Technology nr.40/1994**;
- [77] Januskiewicz K.T., Numerical simulation of the operation of big electric bell-furnaces, **Seminar-Heat Transfer in Electroheat, Lodz 1991**;
- [78] Jiang Qin, An upper bound approach to plane-strain problems using a general triangular element, **Materials Processing Technology Nr.40/1994**;
- [79] Johnson P., Furnace Atmospheres, **ASM-Heat Treatment 1993**;
- [80] Kazantsev E.I., Industrial Furnaces.Design and calculation. Reference book, **MIR Publishers Moscow 1977**;
- [81] Kek-Kiong Tio, Thermal construction resistance: effects of boundary conditions and contact geometries, **Heat and Mass Transfer Nr.6/1992**;
- [82] Kassemi M., Analysis of radiation -natural convection in 1-g and low -g environments using the discrete exchange factor method, **Heat and Mass Transfer Nr.17/1993**;
- [83] Kern Roy, Specification possible en cémentation, **Revue de Traitement Thermique Nr.236/1990**;
- [84] Kratz M., Alimentations électrique pour rechauffeurs à tubes à passage direct de courant, **EDF 1993**;
- [85] Lacroix M., Study of the heat transfer behaviour of a latent heat thermal energy storage unit with a finned tube, **Heat and Mass Transfer Nr.8/1993**;
- [86] Laraqui H., Temperatures de contact et coefficient de partage de flux généré par frottement sec entre deux solides. Approche nouvelle de la génération de flux, **Heat and Mass Transfer Nr.11/1992**;

- [87] Leca, A., Proprietăți termofizice și termodinamice solide - lichide - gaze, Ed.Tehnică, București 1994;
- [88] Letureg P., A two -port network formalism for 3D heat conduction analysis in multilayered media, **Heat and Mass Transfer Nr.5/1993**;
- [89] Liu S,H., Heat transfer in an overhead electrical conductor, **Heat and Mass Transfer Nr.4/1992**;
- [90] Malinowski , A study of the heat -transfer coefficient as a function of temperature and pressure, **Materials Processing Technology Nr.41/1994**;
- [91] Meunier H., La modélisation des fours à charges, **Revue de Traitement Thermique Nr.149/1991**;
- [92] Moyadaux Y, Projet Darts.Recomandation pour la production de Logiciel critique, EDF-DER 1993;
- [93] Murtg C,V,S., Evaluation of radiation reception factors in a rotary kiln using a modified Monte-Carlo scheme, **Heat and Mass Transfer Nr.1/1993**;
- [94] Niedbala R., Heat exchange in glow discharge chambers, **Seminar-Heat Transfer in Electroheat, Lodz 1991**;
- [95] Novak P., Mathematical model of the thermal mode of the electric furnace with the stationary stage, **Seminar Heat Transfer in Electroheat,Lodz 1991**;
- [96] Orfeuil Maurice, Electric Process Heating Technologies. Equipment. Applications, BH Press - Columbus Richland 1989;
- [97] Park E,M., Three -dimensional radiation in absorbing -emitting-scattering media using the modified differential approximation, **Heat and Mass Transfer Nr.5/1993**;
- [98] Peard C., Présentation de TMG, logiciel de modélisation des phénomènes thermiques thermiques, EDF-DER 1991;
- [99] Pepper D., The finite element method. Basic concepts and Application Tucson -SUA 1992;
- [100] Popa B., Transfer de căldură în procesele industriale, Ed. Dacia, Cluj-Napoca 1975;
- [101] Plard C., Modélisation des fours électriques industriels à résistances, EDF 1996;
- [102] Prasad G,K., Three-dimensional boundary element thermal shape sensisitivity analysis, **Heat and Mass Transfer Nr.6/1992**;
- [103] Press W, H., Numerical Recipes. The art of scientific computing, Cambridge University Press 1992;
- [104] Radcenko V, Criterii de optimizare a proceselor termice, Ed.Tehnică 1977;
- [105] Rajacopalan V., Principes et application des électrotechnologies, CCE-Cheneilière 1993;
- [106] Rao, S.S., The finite element method in engineering, 1992;
- [107] Roempher D., Kohlenstoff und Hörteverland in der Einsatzhartungsschieht. Zusatzmodul fur Diffusinsrecher, **Heat and Mass Transfer Nr.6/1989**;
- [108] Rohsenow W., Handbook of Heat Transfer Fundamentals, Mc.Grow Hill Book Company 1986;
- [109] Rowe J.G., Furnace Atmosphere Control, ASM-Heat Treatment 1993;
- [110] Rusu R, Modelarea matematică și conducerea cu calculatorul a proceselor de tratament termic, Conf. Națională de tratamente termice, Cluj 1994;

- [111] Sângeorzan D., Echipamente de reglare numerică, Editura Militară, București 1990;
- [112] Sângeorzan D., Reglatoare adaptive, Editura Militară, București 1992;
- [113] Shepherd W., Thyristor Control of Ac.Circuits, Bradford University Press 1975;
- [114] Shouling Hou, A discrete element method for composite media:one-dimensional heat conduction, *Heat and Mass Transfer* Nr.12/1992;
- [115] Shouling Hou, A discrete element method for composite media:one-dimensional heat conduction, *Heat and Mass Transfer* Nr.9/1992;
- [116] Show B,D., Asymptotic analysis of the lumped capacitance approximation, *Heat and Mass Transfer* Nr.4/1993;
- [117] Siegel R., Howell I.R., Thermal radiations heat transfer, 1992;
- [118] Simonsen J,C., Thermal hysteresis in fibrous insulation, *Heat and Mass Transfer* Nr.18/1993;
- [119] Singh B.P., Modelling radiative heat transfer in packed beds, *Heat and Mass Transfer* Nr.6/1992;
- [120] Sirelman T., The isotherms migration method in the theory and practice of heat and mass transfer investigation,
  - 1-Kinematics of temperature fields
  - 2-Numerical analytical determination of temperature fields,*Heat and Mass Transfer* Nr.11/1992;
- [121] Sluzalec A., Shape optimisation of thermo-diffusive systems, *Heat and Mass Transfer* Nr.5/1992;
- [122] Sluzalec A., Shape optimisation of thermo-diffusive systems, *Heat and Mass Transfer* Nr.9/1992;
- [123] Soderval H., Kanthal furnace products. A lecture on heating. Alloys and industrial application, *Kanthal* 1990;
- [124] Stark C., Improved heat -transfer models for fibrous insulations, *Heat and Mass Transfer* Nr.3/1993;
- [125] Stark C., Improved heat -transfer models for fibrous insulations, *Heat and Mass Transfer* Nr.17/1993;
- [126] Stefens P.F., Thermal diffusivity and the simulation of continuous heating processes, *Seminar-Heat Transfer in Electroheat*, Lodz 1991;
- [127] Stickers C,A., Gas Carburizing, *ASM-Heat Treatment* 1993;
- [128] Swith W., Types of Heat-Treating Furnaces, *ASM-Heat Treatment* 1993;
- [129] Taktak R., Optimal experimental design for estimating thermal proprieties of composite materials, *Heat and Mass Transfer* nr.12/1993;
- [130] Tenney S., Temperature Control, *ASM-Heat Treatment* 1993;
- [131] Tanasawa I.ș.a, *Heat and Mass Transfer in Material Processing*, 1991;
- [132] Vadasz P., The effect of perfectly conducting side walls on natural convection in porous media, *Heat and Mass Transfer* Nr.5/1993;
- [133] Vinton B., Perspectives d'avenir des traitements thermiques d'après les réponses à une enquête de la revue Heat Treating, *Revue de Traitement Thermique* nr.241/1990;
- [134] Vogel J., A simple invers heat conduction method with optimisation, *Heat and Mass Transfer* Nr.17/1993;
- [135] Volkov E., Numerical Method, *MIR-Published Moskow* 1986;



- [136] Von P.Gijswijt, Steuerung für den Verlauf der Kohlenstoffdiffusion im Werkstück unter Einsatz eines Prozessrechners, **Gaswärme Nr.9/1983**;
- [137] Vosnesenski A., Mărimea eficacității instalațiilor termotehnice industriale, **Ed.tehnică 1967**;
- [138] Yang X., Les perturbations générées par les gradateurs alimentant des Charges résistives et inductives constants et solutions, **EDF 1993**;
- [139] Zamfirescu L., Automatizarea cuptoarelor industriale, **Ed.Tehnică, București 1971**;
- [140] Wang D.M., An approximate solution for the dynamic response of wall transfer probes, **Heat and Mass Transfer nr.18/1993**;
- [141] Weissohn K.M., Moderne Auswertelektroniken für Sauerstoffmesszellen zur Automatisierung von Wärmebehandlungsanlagen, **HTM Nr.41/1986**;
- [142] Wen-Shing Yu, Conjugate problems of conduction and free convection on vertical and horizontal flat plates, **Heat and Mass Transfer Nr.5/1993**;
- [143] Winkler D., Mathematical simulation of charge temperature for computerized numerical method control, **Seminar Heat-Transfer in Electroheat, Lodz 1991**;
- [144] Wolfram S., Mathematics. A system for doing. Mathematics by computer, Addison Wesley Published Company 1991;
- [145] Wüning J., Weiterentwicklung der Gasaufkohlungsstechnik, **Aichelin W20/1 1974**;
- [146] Wüning J., Gasaufkohlungsverfahren, **Aichelin W20/4 1978**;
- [147] Wyss U., Grundlagen des Einsatzhartens, **HTM Nr.1/1990**;
- [148] \* \* \* , Electrowärme. Theorie und Praxis, **Verlag Girardet Essen 1974**;
- [149] \* \* \* , Temps de chauffage de pièces minces, **Revue de Traitement Thermique Nr.254/1992**;
- [150] \* \* \* , Energy - Efficient Furnace Design and Operation, **ASM-Heat Treatment 1993**;
- [151] \* \* \* , Atmosphere batch furnaces, **Ipsen 1992**;
- [152] \* \* \* , Automation in Heat-Treatment, **Ipsen 1992**;
- [153] \* \* \* , Carbocon. Description et Mode d'emploi, **Process Electronic 1993**;
- [154] \* \* \* , Principe de fonctionnement de la gestion intégrée, **REY 1993**;
- [155] \* \* \* , Resistances Heating Alloys for Applications and Heaters, **Kanthal Handbook 1989**;
- [156] \* \* \* , Resistances Heating Alloys for Applications and Heaters, **Kanthal Handbook 1987**;
- [157] \* \* \* , Electric Heating Elements, **Kanthal Silicon Carbide 1986**;
- [158] \* \* \* , Electric Heating Elements, **Kanthal Super Handbook 1986**;
- [159] \* \* \* , Driver Harris, **Catalog 1989**;
- [160] \* \* \* , Böhler, **Handbook 1994**;
- [161] \* \* \* , Regulateur et programmation électronique, **Eurotherm 1992**;
- [162] \* \* \* , Regulateurs autoadaptifs, **Eurotherm 1992**;
- [163] \* \* \* , Regulateurs auto réglables, **Eurotherm 1992**;
- [164] \* \* \* , Résistances tubulaires et tubes à passage direct de courant. Conception, mise en œuvre et applications industrielles, **EDF-CINELLI 1985**;
- [165] \* \* \* , Les fours à résistances pour les traitements métallurgiques, **EDF-CINELLI 1989**;
- [166] \* \* \* , Le chauffage par résistances, **EDF-CINELLI 1989**.

## ANEXA I

### IMAGINI ALE CUPTORULUI EXPERIMENTAL

#### Conținut

- |                 |  |
|-----------------|--|
| <b>Figura 1</b> | Vedere din față a cuptorului cu atmosferă cu ușă antecameră deschisă |
| <b>Figura 2</b> | Vedere în incinta cuptorului cu atmosferă                            |
| <b>Figura 3</b> | Amplasare rezistoare tubulare  |
| <b>Figura 4</b> | Amplasare unitate transformator SCOTT                                |
| <b>Figura 5</b> | Tipuri de șarjă tratată  |
| <b>Figura 6</b> | Amplasarea pieselor în coșuri  |

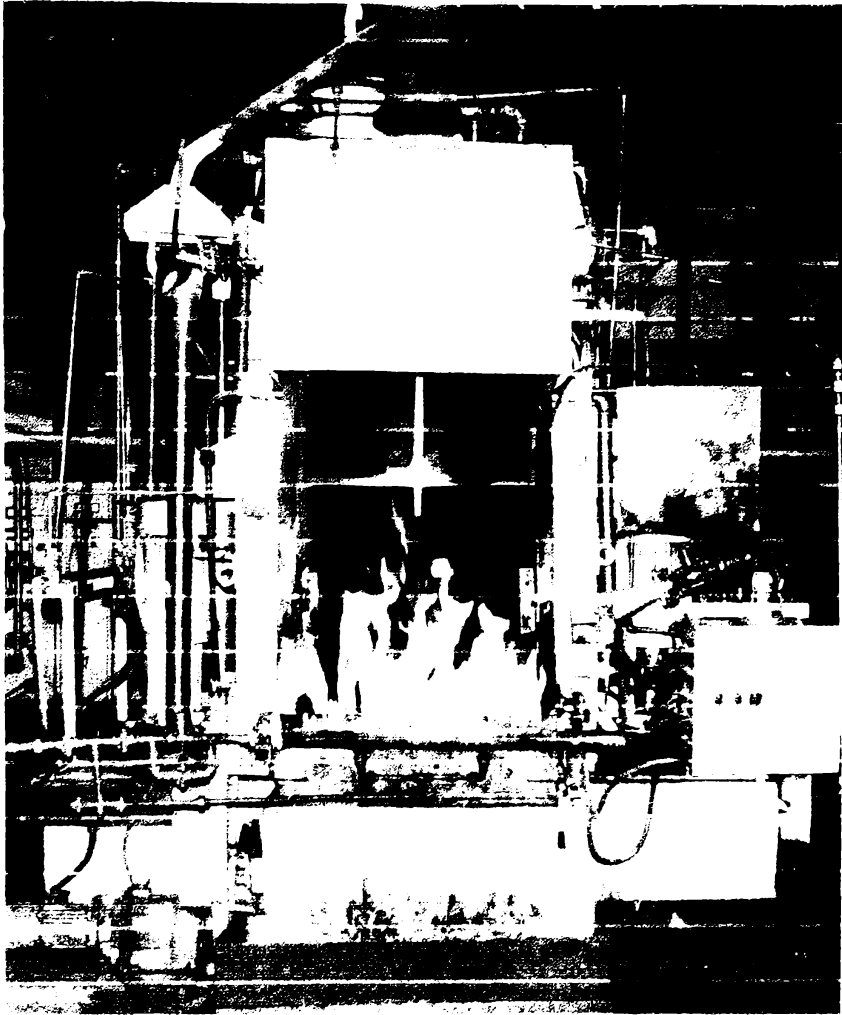


Figura 1

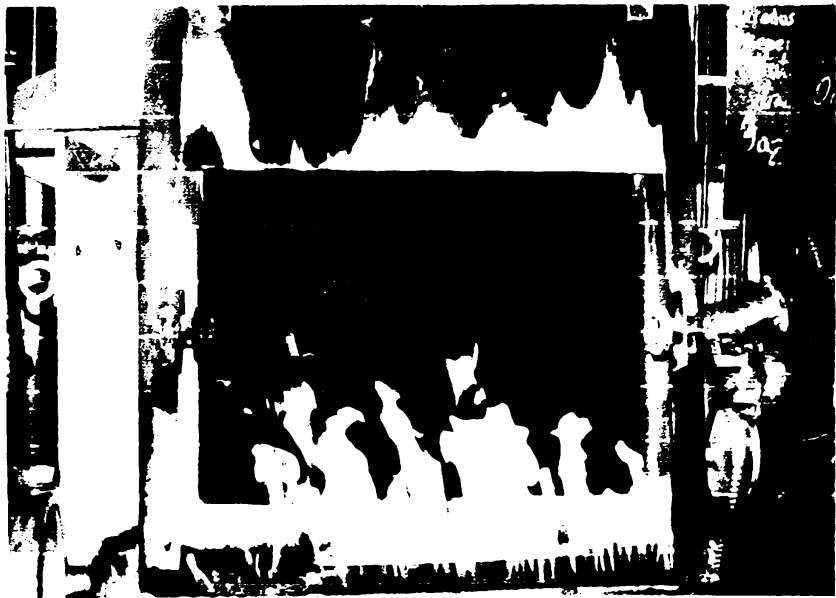


Figura 2



Figura 3

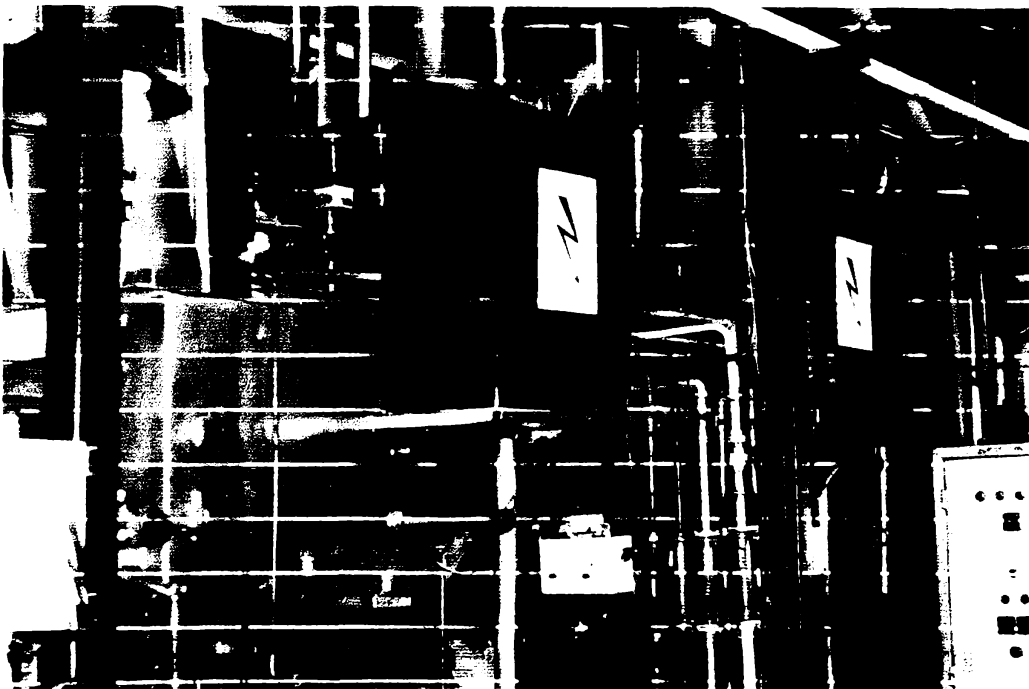


Figura 4



Figura 5



Figura 6

## ANEXA II

### LISTING DUPĂ PROGRAME SURSĂ DIN SUBPROGRAMUL *SIMUL\_TERM*

#### Conținut :

1. Program PROSAVE.PAS - Salvare date de simulare
2. Program FVCUV.PAS - Calculul factorilor de vedere - model șarjă în cuve
3. Program SIMPRG.PAS - Simulare transfer termic
4. Program SIMULCUV.PAS - Simulare transfer termic - model șarjă în cuve

```

(O+,F+)
unit PROsave;
{$F+}
{$S-,I-,R-,D-,V-,N+}
interface

uses CRT,DOS,GRAPH,GRAPH2D,DATEGEN,Progen;

function IauReal(X,Y,LTot,LDec : integer; var V : real; var LastKey : char) : Boolean;
{_____}
function Afis_pierd_sup(var Cuptor : dCuptor;var PTb,PTt,PTa,PAa,Pe,Pdes : real;var Y:integer; Contor : integ
procedure SalvFisier(var Cuptor : dCuptor);
function SortDate : boolean;
Function Citesc_FV(var FVC:FactFV):boolean;
Function Citire_FV(var FVC:FactFV;var FVSARJ:FVs):boolean;
Procedure Gauss_SEIDEL(n1,n3,iter:integer;delta: real;var FVC:FactFV;var RAD, TECP,EPTAB:Supraf);
Procedure PLACI_GAUSS(n,iter:integer;delta: real;var FVC:FactFV;var RAD,TECP,Eptab:Supraf;var FFF:supaux);

implementation

function Afis_pierd_sup(var Cuptor : dCuptor;var PTb,PTt,PTa,PAa,Pe,Pdes : real;var Y:integer; Contor : integ
var Salv : ScrDiv4;
Fel_menu: dBMenu;
X1,Y1,X2,Y2,dY,XText,YText,XSep,XVal : integer;
TOTAL,Sd,Td,Lujg,Lajg,LungB,Ue,R20,CalSpc,Lo,Alfa,Beta,Co,Nb : real;
Ltcl,Ltc2,Ltcm,Debit,DiaT,Nt,DiaA,Na,DiaB,Sb,Lung,Lat,HLP,HLP1,Gama,CTrez : real;
Ch : char;
S,Sir : String;
Sele_Oper : integer;
OK : boolean;
Err_Conv : integer;

Function Trav_per: real;
begin
if Contor=1 then begin
SetTextStyle(TriplexFont,HorizDir,4);
Box(X1,Y1,x2,y2,magenta,SolidFill,Black);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
SetColor(white);
XText := X1 + TextWidth('X');
YText := Y1 + TextHeight('X');
dY := TextHeight('X') div 2;
OutTextXY(XText,YText,'Pierderi suplimentare');
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XText,YText,'Exista pierderi prin traversari de borne [D/N]');
XSep := XText + TextWidth('XXExista pierderi prin traversari de borne [D/N]');
XVal := XSep + TextWidth('XX');
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
BCh := UpCase(ReadKey);
if BCh = chr(0) then begin
BCh := ReadKey;
BCh := chr(0);
end;
until BCh in ['D','N'];
if BCh = 'N' then begin
Trav_per := 0;
EXIT;
end;
OutTextXY(XVal,YText,BCh);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
SetColor(white);
{+++}
SetFillStyle(CloseDotFill,LightGray);
with Fel_Menu do begin
dBf.Path_Name := 'FELMAT.DBF';
dbUse(dBF);
Field_ID := 1;
Entries_Cnt := dBf.Rec_Count;
FirstRecMen := 1;
Crt_Entry := 1;
if Entries_Cnt > 6 then
Entries_Cnt := 6;
X1 := 4*GetMaxX div 20;
Y1 := 4*GetMaxY div 12;
Bkg_Color := LightGray;
Frg_Color := Black;
H_Bkg_Color := Red;
H_Frg_Color := White;
Font := TriplexFont;
end;
dBfPrompt(Fel_Menu,True);
Sele_Oper := dBMenuTo(Fel_Menu);
if Sele_Oper = 0 then begin
dBclose(Fel_Menu.dBF);
RestoreScreen(Fel_Menu.P_Save);
Trav_per := 0;
Exit;
end;
with Fel_Menu do begin
Move(dBF.P_Record^[54],S[1],6);
byte(S[0]) := 6;
Val(S,Lo,Err_Conv);
Move(dBF.P_Record^[60],S[1],4);

```

```

byte(S[0]) := 4;
Val(S,Alfa,Err_Conv);
Move(dBF.P_Record^[64],S[1],6);
byte(S[0]) := 6;
Val(S,Co,Err_Conv);
Move(dBF.P_Record^[70],S[1],7);
byte(S[0]) := 7;
Val(S,beta,Err_Conv);
Move(dBF.P_Record^[82],S[1],8);
byte(S[0]) := 8;
Val(S,gama,Err_Conv);
end;
dBClose(Fel_Menu.dBF);
RestoreScreen(Fel_Menu.P_Save);
Ltc1 := Lo*(1 + Alfa*Cuptor.Tc/1000)/1000;
CalSpc := Co * (1 + Beta * Cuptor.Tc/1000)/1000;
CTrez := 1 + Gama *(Cuptor.Tc-20);
(+++)
repeat
  Box(X1,Y1,x2,y2,magenta,SolidFill,Black);
  SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
  SetColor(white);
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Numarul de borne      [buc]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Lungimea bornei      [mm]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Tensiunea pe element  [V]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Rezistenta el. pe element [ohmi]');
  XSep := XText + TextWidth('Rezistenta el. pe element [ohmi]XX');
  XVal := XSep + TextWidth('XX');
  YText := YText - 3*3 * dY;
  OutTextXY(XSep,YText,':');
  repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,2,0,Nb,Ch);
    if Ch = Esc then begin
      Trav_per := 0;
      Exit;
    end;
    if (Nb < 1) or (Nb > 60) then begin
      SetColor(Black);
      Str(Nb:2:0,S);
      OutTextXY(XVal,YText,S);
      SetColor(White);
      Ok := False;
    end;
  until Ok;
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XSep,YText,':');
  repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,4,0,Lungb,Ch);
    if Ch = Esc then begin
      Trav_per := 0;
      Exit;
    end;
    if (Lungb < 1) or (Lungb > 1000) then begin
      SetColor(Black);
      Str(Lungb:4:0,S);
      OutTextXY(XVal,YText,S);
      SetColor(White);
      Ok := False;
    end;
  until Ok;
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XSep,YText,':');
  repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Ue,Ch);
    if Ch = Esc then begin
      Trav_per := 0;
      Exit;
    end;
    if (Ue < 1) or (Ue > 400) then begin
      SetColor(Black);
      Str(Ue:6:2,S);
      OutTextXY(XVal,YText,S);
      SetColor(White);
      Ok := False;
    end;
  until Ok;
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XSep,YText,':');
  repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,10,6,R20,Ch);
    if Ch = Esc then begin
      Trav_per := 0;
      Exit;
    end;
    if (R20 < 0) or (R20 > 60) then begin
      SetColor(Black);
      Str(R20:10:6,S);
      OutTextXY(XVal,YText,S);
      SetColor(White);
      Ok := False;
    end;
  until Ok;
end;

```



```

end;
until Ok;
YText := YText - 4*3 * dY;
until RaspWarn('Ati introdus corect datele [D/N?'] = 'D';
YText := YText + 5*3 * dY;
OutTextXY(XText,YText,'Tipul circular/dreptunghic [C/D]');
XSep := XText + TextWidth('XXXTipul circular/dreptunghic [C/D]');
XVal := XSep + TextWidth('XX');
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
  Ch := UpCase(ReadKey);
  if Ch = chr(0) then begin
    Ch := ReadKey;
    Ch := chr(0);
  end;
until Ch in ['D','C'];
if Ch = 'C' then begin
  OutTextXY(XVal,YText,'C');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Diametrul bornei [mm]');
  XSep := XText + TextWidth('XXXDiametrul bornei [mm]');
  XVal := XSep + TextWidth('XX');
  OutTextXY(XSep,YText,':');
  repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,DiaB,Ch);
    if Ch = Esc then begin
      Trav_per := 0;
      Exit;
    end;
    if (DiaB < 1) or (DiaB > 50) then begin
      SetColor(Black);
      Str(DiaB:6:2,S);
      OutTextXY(XVal,YText,S);
      SetColor(White);
      Ok := False;
    end;
  until Ok;
  HLP := 0.007*DiaB*Cuptor.Tc + 24*Ue*Ue/(Diab*DiaB*DiaB*R20*R20*CTrez*CTrez);
  Sb := pi*DiaB*DiaB/4;
  YText := YText + 3 * dY;
  Str(HLP:6:2,S);
  OutTextXY(XText,YText,'Temperatura bornei la exterior [gr C] '+S);
  readkey;
end
else begin
  OutTextXY(XVal,YText,'D');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Dimensiuni borna [mm] Grosime');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Latime');
  XSep := XText + TextWidth('XXXDimensiuni borna [mm] Grosime');
  XVal := XSep + TextWidth('XX');
  YText := YText - 3 * dY;
  OutTextXY(XSep,YText,':');
  repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Lung,Ch);
    if Ch = Esc then begin
      Trav_per := 0;
      Exit;
    end;
    if (Lung < 1) or (Lung > 50) then begin
      SetColor(Black);
      Str(Lung:6:2,S);
      OutTextXY(XVal,YText,S);
      SetColor(White);
      Ok := False;
    end;
  until Ok;
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XSep,YText,':');
  repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Lat,Ch);
    if Ch = Esc then begin
      Trav_per := 0;
      Exit;
    end;
    if (Lat < 1) or (Lat > 50) then begin
      SetColor(Black);
      Str(Lat:6:2,S);
      OutTextXY(XVal,YText,S);
      SetColor(White);
      Ok := False;
    end;
  until Ok;
  HLP := 0.014*Cuptor.Tc/(1/Lung + 1/Lat) + 30*Ue*Ue/((Lung*Lat)*(Lung+Lat)*R20*R20*CTrez*CTrez);
  Sb := Lung*Lat;
  YText := YText + 3 * dY;
  Str(HLP:6:2,S);
  OutTextXY(XText,YText,'Temperatura bornei la exterior [gr C] '+S);
  readkey;
end;
end; {of if contor}
.Ltc2 := Lo*(1+Alfa*(HLP+Cuptor.Ta)/1000)/1000;
.Ltcm := (Ltc1+Ltc2)/2;

```

```

if BCh='D' then
  Trav_per:= Nb*Ltcm*Sb*(Cuptor.Tc - HLP - Cuptor.Ta)/(LungB*1000);
end; {traversari perete}

Function Trav_termo: real;
begin
  if Contor=1 then begin
    SetTextStyle(TriplexFont,HorizDir,4);
    Box(X1,Y1,x2,y2,magenta,SolidFill,Black);
    SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
    SetColor(white);
    XText := X1 + TextWidth('X');
    YText := Y1 + TextHeight('X');
    dY := TextHeight('X') div 2;
    OutTextXY(XText,YText,'Pierderi suplimentare');
    YText := YText + 3 * dY;
    OutTextXY(XText,YText,'Exista pierderi prin traversari de termocuple [D/N]');
    XSep := XText + TextWidth('X');
    XVal := XSep + TextWidth('XX');
    OutTextXY(XSep,YText,':');
    repeat
      ECh := UpCase(ReadKey);
      if ECh = chr(0) then begin
        ECh := ReadKey;
        ECh := chr(0);
        end;
      until ECh in ['D','N'];
      if ECh = 'N' then begin
        Trav_termo := 0;
        EXIT;
        end;
    OutTextXY(XVal,YText,ECh);
    repeat
      Box(X1,Y1,x2,y2,magenta,SolidFill,Black);
      SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
      SetColor(white);
      YText := YText + 3 * dY;
      OutTextXY(XText,YText,'Numarul de termocuple [buc]');
      YText := YText + 3 * dY;
      OutTextXY(XText,YText,'Diametrul termocuplei [mm]');
      XSep := XText + TextWidth('X');
      XVal := XSep + TextWidth('XX');
      YText := YText - 3 * dY;
      OutTextXY(XSep,YText,':');
      repeat
        Ok := GetReal(XVal,YText,2,0,Nt,Ch);
        if Ch = Esc then begin
          Trav_termo := 0;
          Exit;
          end;
        if (Nt < 1) or (Nt > 60) then begin
          SetColor(Black);
          Str(Nt:2:0,S);
          OutTextXY(XVal,YText,S);
          SetColor(White);
          Ok := False;
          end;
        until Ok;
      YText := YText + 3 * dY;
      OutTextXY(XSep,YText,':');
      repeat
        Ok := GetReal(XVal,YText,5,2,DiaT,Ch);
        if Ch = Esc then begin
          Trav_termo := 0;
          Exit;
          end;
        if (DiaT < 1) or (DiaT > 1000) then begin
          SetColor(Black);
          Str(DiaT:5:2,S);
          OutTextXY(XVal,YText,S);
          SetColor(White);
          Ok := False;
          end;
        until Ok;
      YText := YText - 2*3 * dY;
      until RaspWarn('Ati introdus corect datele [D/N]?') = 'D';
    end; {of if contor}
    if ECh='D' then begin
      {
      if (DiaT > 0) or (DiaT <= 25) then
        HLP := 5.6*Cuptor.Tc*Cuptor.Tc/100000 + 0.2*Cuptor.Tc + 15.1;
      if (DiaT > 25) or (DiaT <= 35) then
        HLP := 0.31*Cuptor.Tc - 16.5;
      if (DiaT > 35) or (DiaT <=60) then
        HLP := 14.4*Cuptor.Tc*Cuptor.Tc/100000 + 0.17*Cuptor.Tc + 35.4;
      }
      Trav_termo:= Nt*(24.4 + 0.0116*(Cuptor.Tc + HLP))*(Cuptor.Tc - HLP)*1.35*DiaT*DiaT/1000000000;
    end;
  end; {traversari termocuple}

Function Trav_ax: real;
var interm,alta : real;

begin
  Alta := 0;
  INterm := 0;

```

```

repeat
if Contor=1 then begin
SetTextStyle(TriplexFont,HorizDir,4);
Box(X1,Y1,x2,y2,magenta,SolidFill,Black);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
SetColor(white);
XText := X1 + TextWidth('X');
YText := Y1 + TextHeight('X');
dY := TextHeight('X') div 2;
OutTextXY(XText,YText,'Pierderi suplimentare');
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XText,YText,'Exista pierderi prin traversari de axe [D/N]');
XSep := XText + TextWidth('XXExista pierderi prin traversari de axe [D/N]');
XVal := XSep + TextWidth('XX');
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
ACh := UpCase(ReadKey);
if ACh = chr(0) then begin
ACh := ReadKey;
ACh := chr(0);
end;
until ACh in ['D','N'];
if ACh = 'N' then begin
Trav_ax := 0;
EXIT;
end;
OutTextXY(XVal,YText,ACh);
repeat
Box(X1,Y1,x2,y2,magenta,SolidFill,Black);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
SetColor(white);
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XText,YText,'Numarul de axe motor [buc]');
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XText,YText,'Diametrul axului [mm]');
XSep := XText + TextWidth('XXNumarul de axe motor [buc]');
XVal := XSep + TextWidth('XX');
YText := YText - 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
Ok := GetReal(XVal,YText,2,0,Na,Ch);
if Ch = Esc then begin
Trav_ax := 0;
Exit;
end;
if (Na < 1) or (Na > 60) then begin
SetColor(Black);
Str(Na:2:0,S);
OutTextXY(XVal,YText,S);
SetColor(White);
Ok := False;
end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
Ok := GetReal(XVal,YText,5,2,DiaA,Ch);
if Ch = Esc then begin
Trav_ax := 0;
Exit;
end;
if (DiaA < 1) or (DiaA > 1000) then begin
SetColor(Black);
Str(DiaA:5:2,S);
OutTextXY(XVal,YText,S);
SetColor(White);
Ok := False;
end;
until Ok;
YText := YText - 2*3 * dY;
until RaspWarn('Ati introdus corect datele [D/N]?') = 'D';
end; {of if Contor}
if (DiaA > 0) or (DiaA <= 25) then
HLP := (5.6E-5)*Cuptor.Tc*Cuptor.Tc + 0.2*Cuptor.Tc + 15.1;
if (DiaA > 25) or (DiaA <= 35) then
HLP := 0.31*Cuptor.Tc - 16.5;
if (DiaA > 35) or (DiaA <= 90) then
HLP := (14.4E-5)*Cuptor.Tc*Cuptor.Tc + 0.17*Cuptor.Tc + 35.4;
Interm:= Na*(24.4 + (1.16E-2)*(Cuptor.Tc + HLP))*{(Cuptor.Tc - HLP)*1.35*DiaT*DiaT/1000000000;
Alta := Alta +Interm;
XText := X1 + TextWidth('X');
YText := Y1 + TextHeight('X');
until RaspWarn('Mai sint si alte axe motoare[D/N]?') = 'N';
Trav_ax := alta;
end; {traversari axe}

Function Ard_atmo: real;
begin
if Contor=1 then begin
SetTextStyle(TriplexFont,HorizDir,4);
Box(X1,Y1,x2,y2,magenta,SolidFill,Black);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
SetColor(white);
XText := X1 + TextWidth('X');

```

```

YText := Y1 + TextHeight('X');
dY := TextHeight('X') div 2;
OutTextXY(XText,YText,'Pierderi suplimentare');
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XText,YText,'Exista pierderi prin incalzire atmosfera [D/N]');
XSep := XText + TextWidth('XXExista pierderi prin incalzire atmosfera [D/N]');
XVal := XSep + TextWidth('XX');
OutTextXY(XSep,YText,':');
  repeat
    Aah := UpCase(ReadKey);
    if Aah = chr(0) then begin
      Aah := ReadKey;
      Aah := chr(0);
    end;
  until Aah in ['D','N'];
  if Aah = 'N' then begin
    Ard_atmo := 0;
    EXIT;
  end;
OutTextXY(XVal,YText,Aah);
repeat
  Box(X1,Y1,x2,y2,magenta,SolidFill,Black);
  SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
  SetColor(white);
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Debitul de atmosfera [NMc/h]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Tipul de atmosfera Endogaz/eXogaz/Azot [E/X/A]');
  XSep := XText + TextWidth('XXTipul de atmosfera Endogaz/eXogaz/Azot [E/X/A]');
  XVal := XSep + TextWidth('XX');
  YText := YText - 3 * dY;
  OutTextXY(XSep,YText,':');
  repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Debit,Ch);
    if Ch = Esc then begin
      Ard_atmo:= 0;
      Exit;
    end;
    if (Debit < 1) or (Debit > 100) then begin
      SetColor(Black);
      Str(Debit:6:2,S);
      OutTextXY(XVal,YText,S);
      SetColor(White);
      Ok := False;
    end;
  until Ok;
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XSep,YText,':');
  repeat
    TCh := UpCase(ReadKey);
    if TCh = chr(0) then begin
      TCh := ReadKey;
      TCh := chr(0);
    end;
  until TCh in ['E','X','A'];
  OutTextXY(XVal,YText,TCh);
  YText := YText -2*3 * dY;
  until RaspWarn('Ati introdus corect datele [D/N]?') = 'D';
end; {of if Contor}
if Aah='D' then begin
  if TCh='E' then
    Ard_atmo := (0.46*Cuptor.Tc - 81) * Debit/1000;
  if TCh='X' then
    Ard_atmo := (0.43*Cuptor.Tc - 30) * Debit/1000;
  if TCh='A' then
    Ard_atmo := (0.4*Cuptor.Tc - 20) * Debit/1000;
end;
end; {Ardere atmosfera}

Function Etans: real;
begin
  if Contor = 1 then begin
    SetTextStyle(TriplexFont,HorizDir,4);
    Box(X1,Y1,x2,y2,magenta,SolidFill,Black);
    SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
    SetColor(white);
    XText := X1 + TextWidth('X');
    YText := Y1 + TextHeight('X');
    dY := TextHeight('X') div 2;
    OutTextXY(XText,YText,'Pierderi suplimentare');
    YText := YText + 3 * dY;
    OutTextXY(XText,YText,'Exista pierderi prin etansare [D/N]');
    XSep := XText + TextWidth('XXExista pierderi prin etansare [D/N]');
    XVal := XSep + TextWidth('XX');
    OutTextXY(XSep,YText,':');
    repeat
      Eeh := UpCase(ReadKey);
      if Eeh = chr(0) then begin
        Eeh := ReadKey;
        Eeh := chr(0);
      end;
    until Eeh in ['D','N'];
    if Eeh = 'N' then begin
      Etans.:= 0;
    end;
  end;
end;

```

```

EXIT;
end;
OutTextXY(XVal, YText, Eeh);
repeat
  Box(X1, Y1, x2, y2, magenta, SolidFill, Black);
  SetTextStyle(SmallFont, HorizDir, 5);
  SetColor(white);
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText, YText, 'Latimea jgheabului de etansare [mm]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText, YText, 'Lungimea jgheabului de etansare [m]');
  XSep := XText + TextWidth('XXLungimea jgheabului de etansare [m]');
  XVal := XSep + TextWidth('XX');
  YText := YText - 3 * dY;
  OutTextXY(XSep, YText, ':');
  repeat
    Ok := GetReal(XVal, YText, 6, 2, Lajg, Ch);
    if Ch = Esc then begin
      Etans := 0;
      Exit;
    end;
    if (Lajg < 1) or (Lajg > 50) then begin
      SetColor(Black);
      Str(Lajg:6:2, S);
      OutTextXY(XVal, YText, S);
      SetColor(White);
      Ok := False;
    end;
  until Ok;
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XSep, YText, ':');
  repeat
    Ok := GetReal(XVal, YText, 6, 2, Lujg, Ch);
    if Ch = Esc then begin
      Etans := 0;
      Exit;
    end;
    if (Lujg < 1) or (Lujg > 20) then begin
      SetColor(Black);
      Str(Lujg:6:2, S);
      OutTextXY(XVal, YText, S);
      SetColor(White);
      Ok := False;
    end;
  until Ok;
  YText := YText - 2 * 3 * dY;
  until RaspWarn('Ati introdus corect datele [D/N]?') = 'D';
end; {of if contor}
if Eeh = 'D' then begin
  if Lajg <= 25 then
    Etans := (0.0014 * Cuptor.Tc * Cuptor.Tc - 1.05 * Cuptor.Tc + 244) * Lujg / 1000
  else
    Etans := (0.005 * Cuptor.Tc * Cuptor.Tc - 4.1 * Cuptor.Tc + 980) * Lujg / 1000;
end;
end; {Etansari}

Function Desc_usi: real;
begin
  if Contor = 1 then begin
    SetTextStyle(TriplexFont, HorizDir, 4);
    Box(X1, Y1, x2, y2, magenta, SolidFill, Black);
    SetTextStyle(SmallFont, HorizDir, 5);
    SetColor(white);
    XText := X1 + TextWidth('X');
    YText := Y1 + TextHeight('X');
    dY := TextHeight('X') div 2;
    OutTextXY(XText, YText, 'Pierderi suplimentare');
    YText := YText + 3 * dY;
    OutTextXY(XText, YText, 'Exista pierderi prin deschidere usi [D/N]');
    XSep := XText + TextWidth('XXExista pierderi prin deschidere usi [D/N]');
    XVal := XSep + TextWidth('XX');
    OutTextXY(XSep, YText, ':');
    repeat
      DCh := UpCase(ReadKey);
      if DCh = chr(0) then begin
        DCh := ReadKey;
        DCh := chr(0);
      end;
    until DCh in ['D', 'N'];
    if DCh = 'N' then begin
      Desc_usi := 0;
      EXIT;
    end;
  end;
  OutTextXY(XVal, YText, DCh);
  repeat
    Box(X1, Y1, x2, y2, magenta, SolidFill, Black);
    SetTextStyle(SmallFont, HorizDir, 5);
    SetColor(white);
    YText := YText + 3 * dY;
    OutTextXY(XText, YText, 'Suprafata de deschidere [mp]');
    YText := YText + 3 * dY;
    OutTextXY(XText, YText, 'Timp de deschidere [min]');
    XSep := XText + TextWidth('XXSuprafata de deschidere [mp]');
  end;
end;

```

```

XVal := XSep + TextWidth('XX');
YText := YText - 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,'');
repeat
  Ok := GetReal(XVal,YText,5,2,Sd,Ch);
  if Ch = Esc then begin
    Desc_usi:= 0;
    Exit;
  end;
  if (Sd < 0) or (Sd > 20) then begin
    SetColor(Black);
    Str(Sd:5:2,S);
    OutTextXY(XVal,YText,S);
    SetColor(White);
    Ok := False;
  end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,'');
repeat
  Ok := GetReal(XVal,YText,5,2,Td,Ch);
  if Ch = Esc then begin
    Desc_usi:= 0;
    Exit;
  end;
  if (Td < 1) or (Td > 40) then begin
    SetColor(Black);
    Str(Td:5:2,S);
    OutTextXY(XVal,YText,S);
    SetColor(White);
    Ok := False;
  end;
until Ok;
YText := YText -2*3 * dY;
until RaspWarn('Ati introdus corect datele [D/N]?') = 'D';
end; {of IF contor}
if DCh='D' then
  Desc_usi := (0.55E-5*Cuptor.Tc*Cuptor.Tc - 4.3E-3*Cuptor.Tc +0.995) * Sd*Td;
end; {Deschidere usi}
begin
  if Contor<>1 then begin
    HLP1 := Cuptor.Tc;
    Cuptor.Tc := 0.8 * HLP1;
  end;
  SetTextStyle(TriplexFont,HorizDir,4);
  X1 := 4*GetMaxX div 20;
  Y1 := 4*GetMaxY div 12;
  X2 := GetMaxX-TextWidth('XX');
  Y2 := GetMaxY - 5 * TextHeight('X') div 2;
  Box(X1,Y1,X2,Y2,magenta,SolidFill,Black);
  SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
  SetColor(white);
  XText := X1 + TextWidth('X');
  YText := Y1 + TextHeight('X');
  dY := TextHeight('X') div 2;
  OutTextXY(XText,YText,'Pierderi suplimentare');
  YText := YText + 3 * dY;
  If Contor = 1 then begin
    PTb := Trav_per;
    PTt := Trav_termo;
    PTa := Trav_ax;
    PAa := Ard_atmo;
    Pe := Etans;
    Pdes := Desc_usi;
    Total := PTb + PTt + PTa + PAa + Pe + Pdes;
  end
  else begin
    PTb := PTb*0.8;
    PTt := PTt*0.8;
    PTa := PTa*0.8;
    PAa := PAa*0.8;
    Pe := Pe*0.8;
    Pdes := Pdes*0.8;
    Total := PTb + PTt + PTa + PAa + Pe + Pdes;
  end;
  Box(X1,Y1,X2,Y2,magenta,SolidFill,Black);
  SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
  SetColor(white);
  Str(PTb :10:3,S);
  OutTextXY(XText,YText,'Pierderi traversari borne : '+S+' [kW]');
  YText := YText + 3 * dY;
  Str(PTt :10:3,S);
  OutTextXY(XText,YText,'Pierderi traversari termocuplu : '+S+' [kW]');
  YText := YText + 3 * dY;
  Str(PTa :10:3,S);
  OutTextXY(XText,YText,'Pierderi traversari axe : '+S+' [kW]');
  YText := YText + 3 * dY;
  Str(PAa :10:3,S);
  OutTextXY(XText,YText,'Pierderi incalzire atmosfera : '+S+' [kW]');
  YText := YText + 3 * dY;
  Str(Pe :10:3,S);
  OutTextXY(XText,YText,'Pierderi prin etansare : '+S+' [kW]');
  YText := YText + 3 * dY;
  Str(Pdes :10:3,S);

```

```

OutTextXY(XText,YText,'Pierderi prin deschidere usi : '+S+ ' [kW]');
YText := YText + 3 * dY;
Str(Total :10:3,S);
Str(Cuptor.Tc :4:0,Sir);
OutTextXY(XText,YText,'Pierderi totale suplimentare la Tc='+Sir+': '+S+ ' [kW]');
if Contor>1 then begin
  Cuptor.Tc := HLP1;
end;
Y := YText;
Afis_pierd_sup := Total;
end; (of Afis_pierd_sup)

procedure SalvFisier(var Cuptor : dCuptor);
var i,j :integer;
{ Sir : string;
  } FP : text;
  FP_Name : Str20;

begin
  FP_Name := 'SAVCUP.TMP';
  Assign(FP,FP_Name);
  rewrite(FP);
  if IOResult <> 0 then begin
    DispWarn(FP_Name + ' - nu poate fi deschis in conditii bune');
    Exit;
  end;
  Writeln (FP,' INTEC S. A.- Fil.SIBIU - salvare modelare cuptor');
  Writeln(FP,Cuptor.Den_Cuptor);
  Str(Cuptor.Ta:6:2,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.Tc:6:2,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.Po:10:5,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.Ar:10:5,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.Sech:10:6,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.Man:10:6,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Writeln(FP,Cuptor.Tip_cuptor);
  Str(Cuptor.Dim1:10:5,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.Dim2:10:5,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.Dim3:10:5,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.Dim4:10:5,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.Dim5:10:5,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.Inertia:10:5,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.Taum:10:5,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.BETA1:10:5,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  Str(Cuptor.BETA2:10:5,Sir);
  Writeln(FP,Sir);
  For i:=1 to 6 do begin
    Str(Cuptor.Flux_per1[i]:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Cuptor.Flux_per2[i]:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Cuptor.Cald_per[i]:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Cuptor.Capa_per[i]:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Cuptor.ST[i]:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Cuptor.Per[i].Nr_strat:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Cuptor.Per[i].Cald_u:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Cuptor.Per[i].Flux_u1:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Cuptor.Per[i].Flux_u2:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Cuptor.Per[i].Grosime:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Cuptor.Per[i].Sup_int:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Cuptor.Per[i].Sup_ext:10:5,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    for j:=1 to 5 do begin
      Str(Cuptor.Per[i].Temp[j]:10:5,Sir);
      Writeln(FP,Sir);
      Str(Cuptor.Per[i].Tmax[j]:10:5,Sir);
    end;
  end;
end;

```

```

        Writeln(FP,Sir);
        Str(Cuptor.Per[i].Gr[j]:10:5,Sir);
        Writeln(FP,Sir);
        Str(Cuptor.Per[i].M_vol[j]:10:5,Sir);
        Writeln(FP,Sir);
        Str(Cuptor.Per[i].Lo[j]:10:5,Sir);
        Writeln(FP,Sir);
        Str(Cuptor.Per[i].Lmed[j]:10:5,Sir);
        Writeln(FP,Sir);
        Str(Cuptor.Per[i].Ko[j]:10:5,Sir);
        Writeln(FP,Sir);
        Str(Cuptor.Per[i].Rezist[j]:10:5,Sir);
        Writeln(FP,Sir);
        Str(Cuptor.Per[i].Cald[j]:10:5,Sir);
        Writeln(FP,Sir);
    end;
end;
Close(FP);
end;

{+++++++}

function IauReal(X,Y,LTot,LDec : integer; var V : real; var LastKey : char) : Boolean;
var
    S : string;
    Ch : char;
    E,C : integer;
    More : Boolean;
begin
    S := '';
    More := True;
    C:=0;
    while More do begin
        SetColor(White);
        OutTextXY(X+TextWidth(S),Y,'_');
        Ch := ReadKey;
        LastKey := Ch;

        (if Ch = Esc then begin
            IauReal := False;
            Exit;
            end;

if (Ch = Back) and (Length(S) <> 0) then begin
        SetColor(Black);
        OutTextXY(X+TextWidth(S),Y,'_');
        OutTextXY(X,Y,S);
        Dec(byte(S[0]));
        SetColor(White);
        OutTextXY(X,Y,S);
        if ((c>0) and (Length(S)<LTot-LDec-1)) then c:=0;
        end;
if Ch = Enter then begin
        SetColor(Black);
        OutTextXY(X+TextWidth(S),Y,'_');
        OutTextXY(X,Y,S);
        SetColor(White);
        E := 0;
        if Length(S) > 0 then
            Val(S,V,E);
        if E = 0 then begin
            s:='0';
            Str(V:LTot:LDec,S);
            OutTextXY(X,Y,S);
            IauReal := True;
            end
        else
            IauReal := False;
            Exit;
            end;
if Ch='.' then inc(c);
if (Ch in ['0'..'9','-','+','.']) and (Length(S) < LTot) then
if ((Length(s)=LTot-LDec-1) and (c=0)) then
    Begin
        SetColor(Black);
        OutTextXY(X+TextWidth(S),Y,'_');
        SetColor(White);
        S := S + '.';
        inc(c);
        OutTextXY(X,Y,S);
    end
Else
    Begin
        SetColor(Black);
        OutTextXY(X+TextWidth(S),Y,'_');
        SetColor(White);
        S := S + Ch;

```



```
    OutTextXY(X,Y,S);
end;
```

ANEXA II

```
end; {of while More}
end; {of IauReal}
```

```
function SortDate : boolean;
```

```
Var i,j : integer;
```

```
FP : text;
```

```
FP_Name : Str20;
```

```
begin
```

```
    FP_Name := 'SAVSARJ.TMP';
```

```
    Assign(FP,FP_Name);
```

```
    reset(FP);
```

```
    if IOResult <> 0 then begin
```

```
        DispWarn(FP_Name + ' - nu poate fi deschis in conditii bune');
```

```
        SortDate := False;
```

```
        Exit;
```

```
    end;
```

```
    Readln(FP,Sir);
```

```
    Readln(FP,Sir);
```

```
    byte(Sir[0]) := 1;
```

```
    Val(Sir,Nrmodel,Err_Conv);
```

```
    Readln(FP,Sir);
```

```
    byte(Sir[0]) := 10;
```

```
    Val(Sir,Gbs,Err_Conv);
```

```
    Readln(FP,Sir);
```

```
    byte(Sir[0]) := 10;
```

```
    Val(Sir,Gns,Err_Conv);
```

```
    case Nrmodel of
```

```
        1 : begin
```

```
            {model triunghi}
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 4;
```

```
                Val(Sir,Ncm,Err_Conv);
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 4;
```

```
                Val(Sir,Nrm,Err_Conv);
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 5;
```

```
                Val(Sir,LaTri,Err_Conv);
```

```
            end;
```

```
        2 : begin
```

```
            {model placi}
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 10;
```

```
                Val(Sir,Gros,Err_Conv);
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 10;
```

```
                Val(Sir,Wdist,Err_Conv);
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 5;
```

```
                Val(Sir,Nplaci,Err_Conv);
```

```
            end;
```

```
        3 : begin
```

```
            {model cuve}
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 10;
```

```
                Val(Sir,Gros,Err_Conv);
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 10;
```

```
                Val(Sir,Wdist,Err_Conv);
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 5;
```

```
                Val(Sir,Ncuve,Err_Conv);
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 10;
```

```
                Val(Sir,Lg,Err_Conv);
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 10;
```

```
                Val(Sir,Hg,Err_Conv);
```

```
            end;
```

```
        4 : begin
```

```
            {model triunghi piesa unica}
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 4;
```

```
                Val(Sir,Ncm,Err_Conv);
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 4;
```

```
                Val(Sir,Nrm,Err_Conv);
```

```
                Readln(FP,Sir);
```

```
                byte(Sir[0]) := 5;
```

```
                Val(Sir,LaTri,Err_Conv);
```

```
            end;
```

```
    end;
```

```
    Readln(FP,Sir);
```

```
    byte(Sir[0]) := 10;
```

```
    Val(Sir,Am,Err_Conv);
```

```
    Readln(FP,Sir);
```

```
    byte(Sir[0]) := 10;
```

```
    Val(Sir,Lm,Err_Conv);
```

```
    Readln(FP,Sir);
```

```
    byte(Sir[0]) := 10;
```

```

Val(Sir,Hm,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Lo,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Co,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,alfa,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,beta,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Dens,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Hvs,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Hit,Err_Conv);
Close(FP);

FP_Name := 'SAVCUP.TMP';
Assign(FP,FP_Name);
reset(FP);
if IOResult <> 0 then begin
    DispWarn(FP_Name + ' - nu poate fi deschis in conditii bune');
    SortDate := False;
    Exit;
end;
Readln (FP,Sir);
Readln(FP,Cuptor.Den_cuptor);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 6;
Val(Sir,Cuptor.Ta,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 6;
Val(Sir,Cuptor.Tc,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Po,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;

```

---

```

Val(Sir,Cuptor.Ar,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Sech,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Man,Err_Conv);
Readln(FP,Cuptor.Tip_cuptor);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Dim1,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Dim2,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Dim3,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Dim4,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Dim5,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Inertia,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Taum,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.BETA1,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.BETA2,Err_Conv);
For i:=1 to 6 do begin
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,Cuptor.Flux_per1[i],Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,Cuptor.Flux_per2[i],Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;

```

```

Val(Sir,Cuptor.Cald_per[i],Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Capa_per[i],Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.ST[i],Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Per[i].Nr_strat,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Per[i].Cald_u,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Per[i].Flux_u1,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Per[i].Flux_u2,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Per[i].Grosime,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Per[i].Sup_int,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Cuptor.Per[i].Sup_ext,Err_Conv);
for j:=1 to 5 do begin
  Readln(FP,Sir);
  byte(Sir[0]) := 10;
  Val(Sir,Cuptor.Per[i].Temp[j],Err_Conv);
  Readln(FP,Sir);
  byte(Sir[0]) := 10;
  Val(Sir,Cuptor.Per[i].Tmax[j],Err_Conv);
  Readln(FP,Sir);
  byte(Sir[0]) := 10;
  Val(Sir,Cuptor.Per[i].Gr[j],Err_Conv);
  Readln(FP,Sir);
  byte(Sir[0]) := 10;
  Val(Sir,Cuptor.Per[i].M_vol[j],Err_Conv);
  Readln(FP,Sir);
  byte(Sir[0]) := 10;
  Val(Sir,Cuptor.Per[i].Lo[j],Err_Conv);
  Readln(FP,Sir);

  byte(Sir[0]) := 10;
  Val(Sir,Cuptor.Per[i].Lmed[j],Err_Conv);
  Readln(FP,Sir);
  byte(Sir[0]) := 10;
  Val(Sir,Cuptor.Per[i].Ko[j],Err_Conv);
  Readln(FP,Sir);
  byte(Sir[0]) := 10;
  Val(Sir,Cuptor.Per[i].Rezist[j],Err_Conv);
  Readln(FP,Sir);
  byte(Sir[0]) := 10;
  Val(Sir,Cuptor.Per[i].Cald[j],Err_Conv);
end;
end;
Close(FP);
FP_Name := 'SAVREZ.TMP';
Assign(FP,FP_Name);
reset(FP);
if IOResult <> 0 then begin
  DispWarn(FP_Name + ' - nu poate fi deschis in conditii bune');
  SortDate := False;
  Exit;
end;
Readln(FP,Sir);
Readln(FP,Rez.Tip);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.De,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Di,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Pas,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Sa,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Sr,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Lr,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Perim,Err_Conv);

```

```

Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Srez,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Nelin,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Ab,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Db,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Lb,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Sb,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Dt,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Rez.Dsp,Err_Conv);
  for i:=1 to 4 do begin
    Readln(FP,PerTyp[i].FormaRez);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,PerTyp[i].X,Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,PerTyp[i].X1,Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,PerTyp[i].X2,Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,PerTyp[i].X3,Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,PerTyp[i].Y,Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,PerTyp[i].Y1,Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,PerTyp[i].Y2,Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,PerTyp[i].Y3,Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,PerTyp[i].Y4,Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,PerTyp[i].Y5,Err_Conv);
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 10;
    Val(Sir,PerTyp[i].Z,Err_Conv);
  end;
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Frp,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Epsr,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Tauc,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,R20,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Alfarez,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Urrez,Err_Conv);
Readln(FP,Sir);
byte(Sir[0]) := 10;
Val(Sir,Crez,Err_Conv);
Close(FP);
SortDate := True;
end;{citire date din fisiere}

Function Citesc_FV(var FVC:FactFV):boolean;
Var i,j : integer;
    FP : text;
    FP_Name : Str20;
begin

```

```

FP_Name := 'FVCUVE.TMP';
Assign(FP,FP_Name);
reset(FP);
if IOResult <> 0 then begin
  DispWarn(FP_Name + ' - nu poate fi deschis in conditii bune');
  Citesc_FV := False;
  Exit;
end;
Readln(FP,Sir);
for i:=1 to 40 do begin
  for j:=1 to 40 do begin
    Readln(FP,Sir);
    byte(Sir[0]) := 8;
    Val(Sir,FVC[i,j],Err_Conv);
  end;
end;
Citesc_FV := True;
end;

```

```

Function Citire_FV(var FVC:FactFV;var FVSARJ:FVs):boolean;
Var i,j : integer;
FP : text;
FP_Name : Str20;
begin
  FP_Name := 'FVPLACI.TMP';
  Assign(FP,FP_Name);
  reset(FP);
  if IOResult <> 0 then begin
    DispWarn(FP_Name + ' - nu poate fi deschis in conditii bune');
    Citire_FV := False;
    Exit;
  end;
  Readln(FP,Sir);
  for i:=1 to 40 do begin
    for j:=1 to 40 do begin
      Readln(FP,Sir);
      byte(Sir[0]) := 8;
      Val(Sir,FVC[i,j],Err_Conv);
    end;
  end;
  for i:=1 to 64 do begin
    for j:=1 to 64 do begin
      Readln(FP,Sir);
      byte(Sir[0]) := 8;
      Val(Sir,FVSarj[i,j],Err_Conv);
    end;
  end;
  Close(FP);
  Citire_FV := True;
end;

```

```

Procedure Gauss_SEIDEL(n1,n3,iter:integer;delta: real;var FVC:FactFv;var RAD,TECP,Eptab:Supraf);
var manev,MM1,MM2: real;
flagtest : boolean;
i,j,k : integer;
Nec : array [1..50,1..50] of real;
begin
  for i:=1 to n3+13 do begin
    for j:=1 to n3+13 do
      Nec[i,j] := -(1-Eptab[i])*FVC[i,j]/(1-(1-Eptab[i])*FVC[i,i]);
    Nec[i,i] := 1;
  end;

  for i:=1 to n3+13 do begin
    manev :=Eptab[i]*Sigma*(TECP[i]+273)*(TECP[i]+273)*(TECP[i]+273)*(TECP[i]+273);
    Nec[i,n3+14] :=manev/(1-FVC[i,i]*(1-Eptab[i]));
  end;

  for i:=1 to n3+13 do begin
    Manev := Nec[i,i];
    for j:=1 to n3+14 do
      Nec[i,j] := Nec[i,j]/Manev;
    Nec[i,i] := 1;
  end;

  (
  Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
  SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
  SetColor(white);
  XText := 2* TextWidth('X');
  YText := 2* TextHeight('X');
  dY := TextHeight('X') div 2;
  for j:=1 to n3+14 do begin
    str(Nec[i,j]:10:5,Sir);
    str(i:2,S1);
    str(j:2,S);
    OutTextXY(XText,YText,'nec '+S1+', '+S+' :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
  end;
  READkey;
  )
end;

```

```

flagtest:= false;
k:=0;
repeat
k:=k+1;
for i:=1 to n3+13 do begin
  Manev := RAD[i];
  for j:=1 to n3+13 do
    if i<>j then RAD[i]:=Nec[i,n3+14]-Nec[i,j]*RAD[j];
  if abs(RAD[i]/Manev-1) < delta then
    flagtest := true;
  end;
until (k=iter) or flagtest;
MM1 :=FVC[n3+7,n3+13]*RAD[n3+7]+FVC[n3+8,n3+13]*RAD[n3+8]+FVC[n3+9,n3+13]*RAD[n3+9];
MM2 := MM1 +FVC[n1+1,n3+13]*RAD[n1+1];
MM1 :=FVC[n3+7,n3+13]+FVC[n3+8,n3+13]+FVC[n3+9,n3+13]+FVC[n1+1,n3+13];
RAD[n3+13]:= MM2/MM1;

end;

Procedure PLACI_GAUSS(n,iter:integer;delta: real;var FVC:FactFv;var RAD,TECP,Eptab:Supraf;var FFF:supaux)
var vari1,vari2,MM1,MM2: real;
flagtest : boolean;
i,j,k : integer;
Nec : array [1..50,1..50] of real;
begin

for i:=1 to n+13 do begin
for j:=1 to n+13 do
Nec[i,j] := -(1-Eptab[i])*FVC[i,j]/(1-(1-Eptab[i])*FVC[i,i]);
Nec[i,i] := 1;
end;

for i:=1 to n+13 do begin
vari2 :=Eptab[i]*Sigma*(TECP[i]+273)*(TECP[i]+273)*(TECP[i]+273)*(TECP[i]+273);
Nec[i,n+14] :=vari2/(1-FVC[i,i]*(1-Eptab[i]));
end;

for i:=1 to n+13 do begin
for j:=1 to n+14 do
Nec[i,j] := Nec[i,j]/Nec[i,i];
Nec[i,i] := 1;

( Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
SetColor(white);
XText := 2* TextWidth('X');

YText := 2* TextHeight('X');
dY := TextHeight('X') div 2;
for j:=1 to n+14 do begin
str(Nec[i,j]:10:5,Sir);
str(i:2,S1);
str(j:2,S);
OutTextXY(XText,YText,'nec '+S1+', '+S' :'+Sir);
YText := YText + 3 * dY;
end;
READkey;

) end;
flagtest:= false;
k:=0;
repeat
k:=k+1;
for i:=1 to n+13 do begin
vari2 := RAD[i];
for j:=1 to n+13 do
if i<>j then RAD[i]:=Nec[i,n+14]-Nec[i,j]*RAD[j];
if abs(RAD[i]/vari2-1) < delta then
flagtest := true;
end;

( Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
SetColor(white);
XText := 2* TextWidth('X');
YText := 2* TextHeight('X');
dY := TextHeight('X') div 2;
for i:=1 to n+13 do begin
str(RAD[i]:10:5,Sir);
str(i:2,S1);
OutTextXY(XText,YText,'rad '+S1+' :'+Sir);
YText := YText + 3 * dY;
end;
READkey;
)
until (k=iter) or flagtest;
vari1:= 0;
for i:=1 to n-1 do begin
vari1:=vari1+FVC[n+13+i,n+13]*FFF[n+13+i]*(RAD[i]-RAD[n+13]);
end;
vari2:=0;

```

```

program Fcv;
($M 32768,0,655360)
{$S+,N+,I-,V-}

```



```

uses CRT,DOS,Dategen,Procgen,CVUNIT,Prosave;

```

```

var
  fi,Nc,i,j,l,f,g,Nmax,Jmax:integer;
  d,dt,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,Suma,ca,cb,cc,cd:real;
  Coef1:coef;
  Coef2:coef;
  Coef3:coef;
  Coef4:coef;
  FVCup : FactFv;

```

```

Procedure corect(l:integer;var FVCup:FactFv);
Begin

```

```

  Ra:=0;
  Rb:=0;
  case l of
    1:begin
      Ra:=FVCup[2,1]+FVCup[3*Nc+1,1]+FVCup[3*Nc+2,1];
      if Ra<>1.0 then begin
        FVCup[2,1]:=FVCup[2,1]/Ra;
        FVCup[Nc+1,1]:=FVCup[Nc+1,1]/Ra;
        FVCup[Nc+2,1]:=FVCup[Nc+2,1]/Ra;
        Write('FVCup[2,1]=' ,FVCup[2,1]:7:5);
        ReadLn;
        Write('FVCup[3*Nc+1,1]=' ,FVCup[3*Nc+1,1]:7:5);
        ReadLn;
        WriteLn('FVCup[3*Nc+2,1]=' ,FVCup[3*Nc+2,1]:7:5);
        ReadLn;
        end;
      end;
    2:begin
      Ra:=FVCup[Nc+2,Nc+1]+FVCup[3*Nc+7,Nc+1]+FVCup[3*Nc+8,Nc+1]+FVCup[3*Nc+9,Nc+1];(+FVCup[3*Nc+13,Nc+
      if Ra<>1.0 then begin
        FVCup[Nc+2,Nc+1]:=FVCup[Nc+2,Nc+1]/Ra;
        FVCup[3*Nc+7,Nc+1]:=FVCup[3*Nc+7,Nc+1]/Ra;
        FVCup[3*Nc+8,Nc+1]:=FVCup[3*Nc+8,Nc+1]/Ra;
        FVCup[3*Nc+9,Nc+1]:=FVCup[3*Nc+9,Nc+1]/Ra;
        FVCup[3*Nc+13,Nc+1]:=FVCup[3*Nc+13,Nc+1]/Ra;
        Write('FVCup[Nc+2,Nc+1]=' ,FVCup[Nc+2,Nc+1]:7:5);
        ReadLn;
        Write('FVCup[3*Nc+7,Nc+1]=' ,FVCup[3*Nc+7,Nc+1]:7:5);
        ReadLn;
        Write('FVCup[3*Nc+8,Nc+1]=' ,FVCup[3*Nc+8,Nc+1]:7:5);
        ReadLn;
        Write('FVCup[3*Nc+9,Nc+1]=' ,FVCup[3*Nc+9,Nc+1]:7:5);
        ReadLn;
        WriteLn('FVCup[3*Nc+13,Nc+1]=' ,FVCup[3*Nc+13,Nc+1]:7:5);
        ReadLn;
        end;
      end;
    3:begin
      Ra:=FVCup[2*Nc+2,2*Nc+1]+FVCup[3*Nc+5,2*Nc+1]+FVCup[3*Nc+6,2*Nc+1]+FVCup[3*Nc+11,2*Nc+1];
      if Ra<>1.0 then begin
        FVCup[2*Nc+2,2*Nc+1]:=FVCup[2*Nc+2,2*Nc+1]/Ra;
        FVCup[3*Nc+5,2*Nc+1]:=FVCup[3*Nc+5,2*Nc+1]/Ra;
        FVCup[3*Nc+6,2*Nc+1]:=FVCup[3*Nc+6,2*Nc+1]/Ra;
        FVCup[3*Nc+11,2*Nc+1]:=FVCup[3*Nc+11,2*Nc+1]/Ra;
        Write('FVCup[2*Nc+2,2*Nc+1]=' ,FVCup[2*Nc+2,2*Nc+1]:7:5);
        ReadLn;
        Write('FVCup[3*Nc+5,2*Nc+1]=' ,FVCup[3*Nc+5,2*Nc+1]:7:5);
        ReadLn;
        WriteLn('FVCup[3*Nc+6,2*Nc+1]=' ,FVCup[3*Nc+6,2*Nc+1]:7:5);
        ReadLn;
        Write('FVCup[3*Nc+11,2*Nc+1]=' ,FVCup[3*Nc+11,2*Nc+1]:7:5);
        ReadLn;
        end;
      end;
    4:begin
      for i:=2 to Nc-1 do begin
        Ra:=FVCup[i+1,i]+FVCup[i-1,i];
        end;
        if Ra<>1.0 then begin
          for i:=2 to Nc-1 do begin
            FVCup[i+1,i]:=FVCup[i+1,i]/Ra;
            FVCup[i-1,i]:=FVCup[i-1,i]/Ra;
            Write('FVCup[i+1,i]=' ,FVCup[i+1,i]:7:5);
            ReadLn;
            write('FVCup[i-1,i]=' ,FVCup[i-1,i]:7:5);
            readln;
          end;
        end;
      end;
    5:begin
      for i:=2 to Nc-1 do begin
        Ra:=FVCup[Nc+i+1,Nc+i]+FVCup[Nc+i-1,Nc+i];
        end;
        if Ra<>1.0 then begin
          for i:=2 to Nc-1 do begin
            FVCup[Nc+i+1,Nc+i]:=FVCup[Nc+i+1,Nc+i]/Ra;

```

```

FVCup[Nc+i-1,Nc+i]:=FVCup[Nc+i-1,Nc+i]/Ra;
Write('FVCup[Nc+i+1,Nc+i]=' ,FVCup[Nc+i+1,Nc+i]:7:5);
ReadLn;
write('FVCup[Nc+i-1,Nc+i]=' ,FVCup[Nc+i-1,Nc+i]:7:5);
readln;
end;
end;
end;
6:begin
for i:=2 to Nc-1 do begin
Ra:=FVCup[2*Nc+i+1,2*Nc+i]+FVCup[2*Nc+i-1,2*Nc+i];
end;
if Ra<>1.0 then begin
for i:=2 to Nc-1 do begin
FVCup[2*Nc+i+1,2*Nc+i]:=FVCup[2*Nc+i+1,2*Nc+i]/Ra;
FVCup[2*Nc+i-1,2*Nc+i]:=FVCup[2*Nc+i-1,2*Nc+i]/Ra;
Write('FVCup[2*Nc+i+1,2*Nc+i]=' ,FVCup[2*Nc+i+1,2*Nc+i]:7:5);
ReadLn;
write('FVCup[2*Nc+i-1,2*Nc+i]=' ,FVCup[2*Nc+i-1,2*Nc+i]:7:5);
readln;
end;
end;
end;
7:begin
Ra:=FVCup[Nc-1,Nc]+FVCup[2*Nc,Nc]+FVCup[3*Nc,Nc];
if Ra<>1.0 then begin
FVCup[Nc-1,Nc]:=FVCup[Nc-1,Nc]/Ra;
FVCup[2*Nc,Nc]:=FVCup[2*Nc,Nc]/Ra;
FVCup[3*Nc,Nc]:=FVCup[3*Nc,Nc]/Ra;
Write('FVCup[Nc-1,Nc]=' ,FVCup[Nc-1,Nc]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[2*Nc,Nc]=' ,FVCup[2*Nc,Nc]:7:5);
ReadLn;
write('FVCup[3*Nc,Nc]=' ,FVCup[3*Nc,Nc]:7:5);
readln;
end;
end;
8:begin
Ra:=FVCup[2*Nc-1,2*Nc]+FVCup[Nc,2*Nc]+FVCup[3*Nc,2*Nc];
if Ra<>1.0 then begin
FVCup[2*Nc-1,2*Nc]:=FVCup[2*Nc-1,2*Nc]/Ra;
FVCup[Nc,2*Nc]:=FVCup[Nc,2*Nc]/Ra;
FVCup[3*Nc,2*Nc]:=FVCup[3*Nc,2*Nc]/Ra;
Write('FVCup[2*Nc-1,2*Nc]=' ,FVCup[2*Nc-1,2*Nc]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[Nc,2*Nc]=' ,FVCup[Nc,2*Nc]:7:5);
ReadLn;
write('FVCup[3*Nc,2*Nc]=' ,FVCup[3*Nc,2*Nc]:7:5);
readln;
end;
end;
9:begin
Ra:=FVCup[3*Nc-1,3*Nc]+FVCup[Nc,3*Nc]+FVCup[2*Nc,3*Nc];
if Ra<>1.0 then begin
FVCup[3*Nc-1,3*Nc]:=FVCup[3*Nc-1,3*Nc]/Ra;
FVCup[Nc,3*Nc]:=FVCup[Nc,3*Nc]/Ra;
FVCup[2*Nc,3*Nc]:=FVCup[2*Nc,3*Nc]/Ra;
Write('FVCup[3*Nc-1,3*Nc]=' ,FVCup[3*Nc-1,3*Nc]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[Nc,3*Nc]=' ,FVCup[Nc,3*Nc]:7:5);
ReadLn;
write('FVCup[2*Nc,3*Nc]=' ,FVCup[2*Nc,3*Nc]:7:5);
readln;
end;
end;
10:begin
Ra:=FVCup[1,3*Nc+1]+FVCup[3*Nc+1,3*Nc+1]+FVCup[3*Nc+2,3*Nc+1];
if Ra<>1.0 then begin
FVCup[1,3*Nc+1]:=FVCup[1,3*Nc+1]/Ra;
FVCup[3*Nc+1,3*Nc+1]:=FVCup[3*Nc+1,3*Nc+1]/Ra;
FVCup[3*Nc+2,3*Nc+1]:=FVCup[3*Nc+2,3*Nc+1]/Ra;
Write('FVCup[1,3*Nc+1]=' ,FVCup[1,3*Nc+1]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[3*Nc+1,3*Nc+1]=' ,FVCup[3*Nc+1,3*Nc+1]:7:5);
ReadLn;
WriteLn('FVCup[3*Nc+2,3*Nc+1]=' ,FVCup[3*Nc+2,3*Nc+1]:7:5);
ReadLn;
end;
end;
11:begin
Ra:=FVCup[1,3*Nc+2]+FVCup[3*Nc+1,3*Nc+2];
if Ra<>1.0 then begin
FVCup[1,3*Nc+2]:=FVCup[1,3*Nc+2]/Ra;
FVCup[3*Nc+1,3*Nc+2]:=FVCup[3*Nc+1,3*Nc+2]/Ra;
Write('FVCup[1,3*Nc+2]=' ,FVCup[1,3*Nc+2]:7:5);
ReadLn;
WriteLn('FVCup[3*Nc+1,3*Nc+2]=' ,FVCup[3*Nc+1,3*Nc+2]:7:5);
ReadLn;
end;
end;
12:begin
Ra:=FVCup[3*Nc+3,3*Nc+3]+FVCup[3*Nc+4,3*Nc+3]+FVCup[3*Nc+9,3*Nc+3];
if Ra<>1.0 then begin
FVCup[3*Nc+3,3*Nc+3]:=FVCup[3*Nc+3,3*Nc+3]/Ra;

```



```

FVCup[3*Nc+4,3*Nc+3]:=FVCup[3*Nc+4,3*Nc+3]/Ra;
FVCup[3*Nc+9,3*Nc+3]:=FVCup[3*Nc+9,3*Nc+3]/Ra;
Write('FVCup[3*Nc+3,3*Nc+3]=' ,FVCup[3*Nc+3,3*Nc+3]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[3*Nc+4,3*Nc+3]=' ,FVCup[3*Nc+4,3*Nc+3]:7:5);
ReadLn;
Writeln('FVCup[3*Nc+9,3*Nc+3]=' ,FVCup[3*Nc+9,3*Nc+3]:7:5);
ReadLn;
end;
end;
13:begin
Ra:=FVCup[3*Nc+3,3*Nc+4]+FVCup[3*Nc+9,3*Nc+4];
if Ra>1.0 then begin
FVCup[3*Nc+3,3*Nc+4]:=FVCup[3*Nc+3,3*Nc+4]/Ra;
FVCup[3*Nc+9,3*Nc+4]:=FVCup[3*Nc+9,3*Nc+4]/Ra;
Write('FVCup[3*Nc+3,3*Nc+4]=' ,FVCup[3*Nc+3,3*Nc+4]:7:5);
ReadLn;
Writeln('FVCup[3*Nc+9,3*Nc+4]=' ,FVCup[3*Nc+9,3*Nc+4]:7:5);
ReadLn;
end;
end;
14:begin
Ra:=FVCup[2*Nc+1,3*Nc+5]+FVCup[3*Nc+5,3*Nc+5]+FVCup[3*Nc+6,3*Nc+5]+FVCup[3*Nc+11,3*Nc+5];
if Ra>1.0 then begin
FVCup[2*Nc+1,3*Nc+5]:=FVCup[2*Nc+1,3*Nc+5]/Ra;
FVCup[3*Nc+5,3*Nc+5]:=FVCup[3*Nc+5,3*Nc+5]/Ra;
FVCup[3*Nc+6,3*Nc+5]:=FVCup[3*Nc+6,3*Nc+5]/Ra;
FVCup[3*Nc+11,3*Nc+5]:=FVCup[3*Nc+11,3*Nc+5]/Ra;
Write('FVCup[2*Nc+1,3*Nc+5]=' ,FVCup[2*Nc+1,3*Nc+5]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[3*Nc+5,3*Nc+5]=' ,FVCup[3*Nc+5,3*Nc+5]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[3*Nc+6,3*Nc+5]=' ,FVCup[3*Nc+6,3*Nc+5]:7:5);
ReadLn;
Writeln('FVCup[3*Nc+11,3*Nc+5]=' ,FVCup[3*Nc+11,3*Nc+5]:7:5);
ReadLn;
end;
end;
15:begin
Ra:=FVCup[2*Nc+1,3*Nc+6]+FVCup[3*Nc+5,3*Nc+6]+FVCup[3*Nc+11,3*Nc+6];
if Ra>1.0 then begin
FVCup[2*Nc+1,3*Nc+6]:=FVCup[2*Nc+1,3*Nc+6]/Ra;
FVCup[3*Nc+5,3*Nc+6]:=FVCup[3*Nc+5,3*Nc+6]/Ra;
FVCup[3*Nc+11,3*Nc+6]:=FVCup[3*Nc+11,3*Nc+6]/Ra;
Write('FVCup[2*Nc+1,3*Nc+6]=' ,FVCup[2*Nc+1,3*Nc+6]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[3*Nc+5,3*Nc+6]=' ,FVCup[3*Nc+5,3*Nc+6]:7:5);
ReadLn;
Writeln('FVCup[3*Nc+11,3*Nc+6]=' ,FVCup[3*Nc+11,3*Nc+6]:7:5);
ReadLn;
end;
end;
16:begin
Ra:=FVCup[Nc+1,3*Nc+7]+FVCup[3*Nc+7,3*Nc+7]+FVCup[3*Nc+8,3*Nc+7]+FVCup[3*Nc+13,3*Nc+7];
if Ra>1.0 then begin
FVCup[Nc+1,3*Nc+7]:=FVCup[Nc+1,3*Nc+7]/Ra;
FVCup[3*Nc+7,3*Nc+7]:=FVCup[3*Nc+7,3*Nc+7]/Ra;
FVCup[3*Nc+8,3*Nc+7]:=FVCup[3*Nc+8,3*Nc+7]/Ra;
FVCup[3*Nc+13,3*Nc+7]:=FVCup[3*Nc+13,3*Nc+7]/Ra;
Write('FVCup[Nc+1,3*Nc+7]=' ,FVCup[Nc+1,3*Nc+7]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[3*Nc+7,3*Nc+7]=' ,FVCup[3*Nc+7,3*Nc+7]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[3*Nc+8,3*Nc+7]=' ,FVCup[3*Nc+8,3*Nc+7]:7:5);
ReadLn;
Writeln('FVCup[3*Nc+13,3*Nc+7]=' ,FVCup[3*Nc+13,3*Nc+7]:7:5);
ReadLn;
end;
end;
17:begin
Ra:=FVCup[Nc+1,3*Nc+8]+FVCup[3*Nc+7,3*Nc+8]+FVCup[3*Nc+13,3*Nc+8];
if Ra>1.0 then begin
FVCup[Nc+1,3*Nc+8]:=FVCup[Nc+1,3*Nc+8]/Ra;
FVCup[3*Nc+7,3*Nc+8]:=FVCup[3*Nc+7,3*Nc+8]/Ra;
FVCup[3*Nc+13,3*Nc+8]:=FVCup[3*Nc+13,3*Nc+8]/Ra;
Write('FVCup[Nc+1,3*Nc+8]=' ,FVCup[Nc+1,3*Nc+8]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[3*Nc+7,3*Nc+8]=' ,FVCup[3*Nc+7,3*Nc+8]:7:5);
ReadLn;
Writeln('FVCup[3*Nc+13,3*Nc+8]=' ,FVCup[3*Nc+13,3*Nc+8]:7:5);
ReadLn;
end;
end;
18:begin
Ra:=FVCup[Nc+1,3*Nc+9]+FVCup[3*Nc+3,3*Nc+9]+FVCup[3*Nc+4,3*Nc+9]+FVCup[3*Nc+13,3*Nc+9];
if Ra>1.0 then begin
FVCup[Nc+1,3*Nc+9]:=FVCup[Nc+1,3*Nc+9]/Ra;
FVCup[3*Nc+3,3*Nc+9]:=FVCup[3*Nc+3,3*Nc+9]/Ra;
FVCup[3*Nc+4,3*Nc+9]:=FVCup[3*Nc+4,3*Nc+9]/Ra;
FVCup[3*Nc+13,3*Nc+9]:=FVCup[3*Nc+13,3*Nc+9]/Ra;
Write('FVCup[Nc+1,3*Nc+9]=' ,FVCup[Nc+1,3*Nc+9]:7:5);
ReadLn;
Write('FVCup[3*Nc+3,3*Nc+9]=' ,FVCup[3*Nc+3,3*Nc+9]:7:5);
ReadLn;

```

```

        Write('FVCup[3*Nc+4,3*Nc+9]=' ,FVCup[3*Nc+4,3*Nc+9]:7:5);
        ReadLn;
        WriteLn('FVCup[3*Nc+13,3*Nc+9]=' ,FVCup[3*Nc+13,3*Nc+9]:7:5);
        ReadLn;
        end;
    end;

19:begin
Ra:=FVCup[Nc+1,3*Nc+13]+FVCup[3*Nc+7,3*Nc+13]+FVCup[3*Nc+8,3*Nc+13]+FVCup[3*Nc+9,3*Nc+13];
    if Ra<>1.0 then begin
        FVCup[Nc+1,3*Nc+13]:=FVCup[Nc+1,3*Nc+13]/Ra;
        FVCup[3*Nc+7,3*Nc+13]:=FVCup[3*Nc+7,3*Nc+13]/Ra;
        FVCup[3*Nc+8,3*Nc+13]:=FVCup[3*Nc+8,3*Nc+13]/Ra;
        FVCup[3*Nc+9,3*Nc+13]:=FVCup[3*Nc+9,3*Nc+13]/Ra;
        Write('FVCup[Nc+1,3*Nc+13]=' ,FVCup[Nc+1,3*Nc+13]:7:5);
        ReadLn;
        Write('FVCup[3*Nc+7,3*Nc+13]=' ,FVCup[3*Nc+7,3*Nc+13]:7:5);
        ReadLn;
        Write('FVCup[3*Nc+8,3*Nc+13]=' ,FVCup[3*Nc+8,3*Nc+13]:7:5);
        ReadLn;
        WriteLn('FVCup[3*Nc+9,3*Nc+13]=' ,FVCup[3*Nc+9,3*Nc+13]:7:5);
        ReadLn;
        end;
    end;

end;
end;

Procedure Initdate;
begin
    if not SortDate then begin
        Write('Fisiererele de date(modelare) nu se pot deschide corect');
        halt(1);
        end;
    If Cuptor.Tip_cuptor='C' then begin
        Hc := Cuptor.Dim1;
        Ac := Cuptor.Dim2;
        Lc := Cuptor.Dim3;
        end
    else begin
        Lc := Cuptor.Dim1;
        Hc := Cuptor.Dim3;
        end;
    Nmax:=6;
    Jmax:=6;
    for i:=1 to 45 do begin
        Supr[i] := 0;
        end;
    for i:=1 to 35 do
        for j:=1 to 35 do
            FVCup[i,j] := 0;
        end;
    for i:=1 to 16 do
        begin
            coef1[i]:=0.;
            coef2[i]:=0.;
            coef3[i]:=0.;
            coef4[i]:=0.;
        end;
    Nc := Ncuve;
    for i:=1 to Nc do
        Supr[i]:= Am *(Hm-(i-1)*(Gros+Wdist)*0.002);
    for i:=1 to Nc do
        Supr[Nc+i]:= Am*(Lm/2-(i-1)*(Gros+Wdist)*0.001);
    for i:=1 to Nc do
        Supr[2*Nc+i] := Am*(Lm/2-(i-1)*(Gros+Wdist)*0.001);
    Supr[3*Nc+2]:=Hc*Ac;
    Supr[3*Nc+1]:=(pi*Rez.de*Supr[3*Nc+2])/Rez.pas;
    Supr[3*Nc+4]:=Lc*Ac*(Hc-Hm-Hvs)/Lm;
    Supr[3*Nc+3]:=(pi*Rez.de*Supr[3*Nc+4])/Rez.pas;
    Supr[3*Nc+6]:=Lc*Ac*Hvs/Lm;
    Supr[3*Nc+5]:=(pi*Rez.de*Supr[3*Nc+6])/Rez.pas;
    Supr[3*Nc+8]:=Ac*(Hc-Hm-Hvs);
    Supr[3*Nc+7]:=(pi*Rez.de*Supr[3*Nc+8])/Rez.pas;
    Supr[3*Nc+9]:=Lc*Ac/2;
    Supr[3*Nc+11]:=Supr[3*Nc+9];
    Supr[3*Nc+13]:=Hit*Am;
end;
Procedure Cit_FV1;
begin
    fi:=0;
    d:=Wdist*0.001;
    a:=Hm-2*(i-1)*(Gros+Wdist)*0.001;
    b:=Hm-2*i*(Gros+Wdist)*0.001;
    c:=Am;
    b1:=(Gros+Wdist)*0.001;
    b2:=0;
    c1:=0;
    c2:=0;
    z:=0;
    ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
    Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,c1);
    FVCup[i+1,i]:=Suma/(2*pi*Supr[i+1]);
    FVCup[i,i+1]:=FVCup[i+1,i]*Supr[i+1]/Supr[i];
    Write('FVCup[i,i+1]=' ,FVCup[i,i+1]:7:5);
    ReadLn;
end;
end;
end;

```

```

        WriteLn('FVCup[i+1,i]=',FVCup[i+1,i]:7:5);
        ReadLn;
end;

Begin
  clrscr;
  Initdate;
  (* Pas pt. calculul FactVed 1,k+2 *)
  for f:=1 to 17 do
    begin
      case f of
        1: begin
            for i:=1 to Nc-1 do
              begin
                Cit_FV1;
              end;
            end;
          2: begin
            for i:=1 to Nc-1 do
              begin
                fi:=0;
                d:=Wdist*0.001;
                a:=Lm/2-2*(i-1)*(Gros+Wdist)*0.001;
                b:=Lm/2-2*i*(Gros+Wdist)*0.001;
                c:=Am;
                b1:=(Gros+Wdist)*0.001;
                b2:=0;
                c1:=0;
                c2:=0;
                z:=0;
                ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
                Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef4);
                FVCup[Nc+i+1,Nc+i]:=Suma/(2*pi*Supr[Nc+i+1]);
                FVCup[Nc+i,Nc+i+1]:=FVCup[Nc+i+1,Nc+i]*Supr[Nc+i+1]/Supr[Nc+i];
                Write('FVCup[Nc+i+1,Nc+i]=',FVCup[Nc+i+1,Nc+i]:7:5);
                ReadLn;
                WriteLn('FVCup[Nc+i,Nc+i+1]=',FVCup[Nc+i,Nc+i+1]:7:5);
                ReadLn;
              end;
            end;
          3: begin
            for i:=1 to Nc-1 do
              begin
                fi:=0;
                d:=Wdist*0.001;
                a:=Lm/2-2*(i-1)*(Gros+Wdist)*0.001;
                b:=Lm/2-2*i*(Gros+Wdist)*0.001;
                c:=Am;
                b1:=(Gros+Wdist)*0.001;
                b2:=0;
                c1:=0;
                c2:=0;
                z:=0;
                ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
                Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef4);
                FVCup[2*Nc+i+1,2*Nc+i]:=Suma/(2*pi*Supr[2*Nc+i+1]);
                FVCup[2*Nc+i,2*Nc+i+1]:=FVCup[2*Nc+i+1,2*Nc+i]*Supr[2*Nc+i+1]/Supr[2*Nc+i];
                Write('FVCup[2*Nc+i+1,2*Nc+i]=',FVCup[2*Nc+i+1,2*Nc+i]:7:5);
                ReadLn;
                WriteLn('FVCup[2*Nc+i,2*Nc+i+1]=',FVCup[2*Nc+i,2*Nc+i+1]:7:5);
                ReadLn;
              end;
            end;
          4: begin
            fi:=0;
            d:=(Lc-Lm)/2;
            a:=Hc;
            b:=Hm;
            c:=Ac;
            b1:=Hvs;
            b2:=Hc-Hm-livs;
            c1:=(Ac-Am)/2;
            c2:=c1;
            z:=0;
            ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
            Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef4);
            FVCup[1,3*Nc+2]:=Suma/(2*pi*Supr[1]);
            write('FVCup[1,3*Nc+2]=',FVCup[1,3*Nc+2]:7:5);
            readln;
            FVCup[3*Nc+2,1]:=FVCup[1,3*Nc+2]*Supr[1]/Supr[3*Nc+2];
            write('FVCup[3*Nc+2,1]=',FVCup[3*Nc+2,1]:7:5);
            readln;
            FVCup[1,3*Nc+1]:=Frp*FVCup[3*Nc+2,1];
            write('FVCup[1,3*Nc+1]=',FVCup[1,3*Nc+1]:7:5);
            readln;
            FVCup[3*Nc+1,1]:=FVCup[1,3*Nc+1]*Supr[1]/Supr[3*Nc+1];
            write('FVCup[3*Nc+1,1]=',FVCup[3*Nc+1,1]:7:5);
            readln;
            FVCup[3*Nc+1,3*Nc+1]:=1-FVCup[3*Nc+1,1]-Frp;
            write('FVCup[3*Nc+1,3*Nc+1]=',FVCup[3*Nc+1,3*Nc+1]:7:5);
            readln;
            FVCup[3*Nc+3,3*Nc+3]:=1-FVCup[3*Nc+1,1]-Frp;

```

ANEXA II

```

write('FVCup[3*Nc+3,3*Nc+3]=' ,FVCup[3*Nc+3,3*Nc+3]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+5,3*Nc+5]:=1-FVCup[3*Nc+1,1]-Frp;
write('FVCup[3*Nc+5,3*Nc+5]=' ,FVCup[3*Nc+5,3*Nc+5]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+7,3*Nc+7]:=1-FVCup[3*Nc+1,1]-Frp;
write('FVCup[3*Nc+7,3*Nc+7]=' ,FVCup[3*Nc+7,3*Nc+7]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+1,3*Nc+2]:=Frp;
write('FVCup[3*Nc+1,3*Nc+2]=' ,FVCup[3*Nc+1,3*Nc+2]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+3,3*Nc+4]:=Frp;
write('FVCup[3*Nc+3,3*Nc+4]=' ,FVCup[3*Nc+3,3*Nc+4]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+5,3*Nc+6]:=Frp;
write('FVCup[3*Nc+5,3*Nc+6]=' ,FVCup[3*Nc+5,3*Nc+6]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+7,3*Nc+8]:=Frp;
write('FVCup[3*Nc+7,3*Nc+8]=' ,FVCup[3*Nc+7,3*Nc+8]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+2,3*Nc+1]:=Frp*Supr[3*Nc+1]/Supr[3*Nc+2];
write('FVCup[3*Nc+2,3*Nc+1]=' ,FVCup[3*Nc+2,3*Nc+1]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+4,3*Nc+3]:=Frp*Supr[3*Nc+3]/Supr[3*Nc+4];
write('FVCup[3*Nc+4,3*Nc+3]=' ,FVCup[3*Nc+4,3*Nc+3]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+6,3*Nc+5]:=Frp*Supr[3*Nc+5]/Supr[3*Nc+6];
write('FVCup[3*Nc+6,3*Nc+5]=' ,FVCup[3*Nc+6,3*Nc+5]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+8,3*Nc+7]:=Frp*Supr[3*Nc+7]/Supr[3*Nc+8];
writeLn('FVCup[3*Nc+8,3*Nc+7]=' ,FVCup[3*Nc+8,3*Nc+7]:7:5);
readln;
end;
5: begin
fi:=90;
d:=0;
a:=Lg/2;
b:=Hg;
c:=Am;
b1:=0;
b2:=0;
c1:=0;
c2:=0;
z:=0;
ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef
FVCup[Nc,2*Nc]:=Suma/(2*pi*Supr[Nc]);
FVCup[2*Nc,Nc]:=FVCup[Nc,2*Nc]*Supr[Nc]/Supr[2*Nc];
write('FVCup[Nc,2*Nc]=' ,FVCup[Nc,2*Nc]:7:5);
ReadLn;
writeLn('FVCup[2*Nc,Nc]=' ,FVCup[2*Nc,Nc]:7:5);
ReadLn;
end;
6: begin
fi:=90;
d:=0;
a:=Lg/2;
b:=Hg;
c:=Am;
b1:=0;
b2:=0;
c1:=0;
c2:=0;
z:=0;
ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef
FVCup[Nc,3*Nc]:=Suma/(2*pi*Supr[Nc]);
FVCup[3*Nc,Nc]:=FVCup[Nc,3*Nc]*Supr[Nc]/Supr[3*Nc];
write('FVCup[Nc,3*Nc]=' ,FVCup[Nc,3*Nc]:7:5);
ReadLn;
writeLn('FVCup[3*Nc,Nc]=' ,FVCup[3*Nc,Nc]:7:5);
ReadLn;
end;
7: begin
fi:=0;
d:=Hg;
a:=Lg/2;
b:=Lg/2;
c:=Am;
b1:=0;
b2:=0;
c1:=0;
c2:=0;
z:=0;
ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef
FVCup[2*Nc,3*Nc]:=Suma/(2*pi*Supr[2*Nc]);
FVCup[3*Nc,2*Nc]:=FVCup[2*Nc,3*Nc]*Supr[2*Nc]/Supr[3*Nc];
write('FVCup[2*Nc,3*Nc]=' ,FVCup[2*Nc,3*Nc]:7:5);
ReadLn;
writeLn('FVCup[3*Nc,2*Nc]=' ,FVCup[3*Nc,2*Nc]:7:5);
ReadLn;
end;
end;

```

```
8: begin
  fi:=0;
  d:=Hc-Hm-Hvs;
  a:=Lc/2;
  b:=Lm/2;
  c:=Ac;
  b1:=(Lc-Lm)/2;
  b2:=0;
  c1:=(Ac-Am)/2;
  c2:=c1;
  z:=0;
  ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
  Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef4);
  FVCup[Nc+1,3*Nc+9]:=Suma/(2*pi*Supr[Nc+1]);
  FVCup[3*Nc+9,Nc+1]:=FVCup[Nc+1,3*Nc+9]*Supr[Nc+1]/Supr[3*Nc+9];
  Write('FVCup[Nc+1,3*Nc+9]=',FVCup[Nc+1,3*Nc+9]:7:5);
  ReadLn;
  WriteLn('FVCup[3*Nc+9,Nc+1]=',FVCup[3*Nc+9,Nc+1]:7:5);
  ReadLn;
end;
9: begin
  fi:=0;
  d:=Hvs;
  a:=Lc/2;
  b:=Lm/2;
  c:=Am;
  b1:=(Lc-Lm)/2;
  b2:=0;
  c1:=(Ac-Am)/2;
  c2:=c1;
  z:=0;
  ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
  Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef4);
  FVCup[2*Nc+1,3*Nc+11]:=Suma/(2*pi*Supr[2*Nc+1]);
  FVCup[3*Nc+11,2*Nc+1]:=FVCup[2*Nc+1,3*Nc+11]*Supr[2*Nc+1]/Supr[3*Nc+11];
  Write('FVCup[2*Nc+1,3*Nc+11]=',FVCup[2*Nc+1,3*Nc+11]:7:5);
  ReadLn;
  WriteLn('FVCup[3*Nc+11,2*Nc+1]=',FVCup[3*Nc+11,2*Nc+1]:7:5);
  ReadLn;
end;
10: begin
  fi:=90;
  d:=0;
  a:=Hc-Hm-Hvs;
  b:=Lm/2;
  c:=Ac;
  b1:=(Lc-Lm)/2;
  b2:=0;
  c1:=(Ac-Am)/2;
  c2:=c1;
  z:=0;
  ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
  Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef4);
  FVCup[Nc+1,3*Nc+8]:=Suma/(2*pi*Supr[Nc+1]);
  FVCup[3*Nc+8,Nc+1]:=FVCup[Nc+1,3*Nc+8]*Supr[Nc+1]/Supr[3*Nc+8];
  FVCup[Nc+1,3*Nc+7]:=Frp*FVCup[3*Nc+8,Nc+1];
  FVCup[3*Nc+7,Nc+1]:=FVCup[Nc+1,3*Nc+7]*Supr[Nc+1]/Supr[3*Nc+7];
  Write('FVCup[Nc+1,3*Nc+8]=',FVCup[Nc+1,3*Nc+8]:7:5);
  ReadLn;
  Write('FVCup[3*Nc+8,Nc+1]=',FVCup[3*Nc+8,Nc+1]:7:5);
  ReadLn;
  Write('FVCup[Nc+1,3*Nc+7]=',FVCup[Nc+1,3*Nc+7]:7:5);
  ReadLn;
  WriteLn('FVCup[3*Nc+7,Nc+1]=',FVCup[3*Nc+7,Nc+1]:7:5);
  ReadLn;
end;
11: begin
  fi:=90;
  d:=0;
  a:=Hvs;
  b:=Lm/2;
  c:=Am;
  b1:=(Lc-Lm)/2;
  b2:=0;
  c1:=(Ac-Am)/2;
  c2:=c1;
  z:=0;
  ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
  Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef4);
  FVCup[2*Nc+1,3*Nc+6]:=Suma/(2*pi*Supr[2*Nc+1]);
  FVCup[3*Nc+6,2*Nc+1]:=FVCup[2*Nc+1,3*Nc+6]*Supr[2*Nc+1]/Supr[3*Nc+6];
  FVCup[2*Nc+1,3*Nc+5]:=Frp*FVCup[3*Nc+6,2*Nc+1];
  FVCup[3*Nc+5,2*Nc+1]:=FVCup[2*Nc+1,3*Nc+5]*Supr[2*Nc+1]/Supr[3*Nc+5];
  Write('FVCup[2*Nc+1,3*Nc+6]=',FVCup[2*Nc+1,3*Nc+6]:7:5);
  ReadLn;
  Write('FVCup[3*Nc+6,2*Nc+1]=',FVCup[3*Nc+6,2*Nc+1]:7:5);
  ReadLn;
  Write('FVCup[2*Nc+1,3*Nc+5]=',FVCup[2*Nc+1,3*Nc+5]:7:5);
  ReadLn;
  WriteLn('FVCup[3*Nc+5,2*Nc+1]=',FVCup[3*Nc+5,2*Nc+1]:7:5);
  ReadLn;
end;
12: begin
  fi:=90;
```

```

d:=0;
a:=Lc*(Hc-Hm-Hvs)/Lm;
b:=Lc/2;
c:=Ac;
b1:=0;
b2:=0;
c1:=0;
c2:=0;
z:=0;
ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef
FVCup[3*Nc+9,3*Nc+4]:=Suma/(2*pi*Supr[3*Nc+9]);
write('FVCup[3*Nc+9,3*Nc+4]=' ,FVCup[3*Nc+9,3*Nc+4]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+4,3*Nc+9]:=FVCup[3*Nc+9,3*Nc+4]*Supr[3*Nc+9]/Supr[3*Nc+4];
write('FVCup[3*Nc+4,3*Nc+9]=' ,FVCup[3*Nc+4,3*Nc+9]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+9,3*Nc+3]:=Frp*FVCup[3*Nc+4,3*Nc+9];
write('FVCup[3*Nc+9,3*Nc+3]=' ,FVCup[3*Nc+9,3*Nc+3]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+3,3*Nc+9]:=FVCup[3*Nc+9,3*Nc+3]*Supr[3*Nc+9]/Supr[3*Nc+3];
writeLn('FVCup[3*Nc+3,3*Nc+9]=' ,FVCup[3*Nc+3,3*Nc+9]:7:5);
readln;
end;
13: begin
fi:=90;
d:=0;
a:=Lc*Hvs/Lm;
b:=Lc/2;
c:=Ac;
b1:=0;
b2:=0;
c1:=0;
c2:=0;
z:=0;
ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef
FVCup[3*Nc+11,3*Nc+6]:=Suma/(2*pi*Supr[3*Nc+11]);
write('FVCup[3*Nc+11,3*Nc+6]=' ,FVCup[3*Nc+11,3*Nc+6]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+6,3*Nc+11]:=FVCup[3*Nc+11,3*Nc+6]*Supr[3*Nc+11]/Supr[3*Nc+6];
write('FVCup[3*Nc+6,3*Nc+11]=' ,FVCup[3*Nc+6,3*Nc+11]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+11,3*Nc+5]:=Frp*FVCup[3*Nc+6,3*Nc+11];
write('FVCup[3*Nc+11,3*Nc+5]=' ,FVCup[3*Nc+11,3*Nc+5]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+5,3*Nc+11]:=FVCup[3*Nc+11,3*Nc+5]*Supr[3*Nc+11]/Supr[3*Nc+5];
writeLn('FVCup[3*Nc+5,3*Nc+11]=' ,FVCup[3*Nc+5,3*Nc+11]:7:5);
readln;
end;
14: begin
fi:=0;
d:=Lc/2;
a:=Hc-Hm-Hvs;
b:=Hit;
c:=Ac;
b1:=0;
b2:=0;
c1:=(Ac-Am)/2;
c2:=c1;
z:=0;
ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef
FVCup[3*Nc+13,3*Nc+8]:=Suma/(2*pi*Supr[3*Nc+13]);
write('FVCup[3*Nc+13,3*Nc+8]=' ,FVCup[3*Nc+13,3*Nc+8]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+8,3*Nc+13]:=FVCup[3*Nc+13,3*Nc+8]*Supr[3*Nc+13]/Supr[3*Nc+8];
write('FVCup[3*Nc+8,3*Nc+13]=' ,FVCup[3*Nc+8,3*Nc+13]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+13,3*Nc+7]:=Frp*FVCup[3*Nc+8,3*Nc+13];
write('FVCup[3*Nc+13,3*Nc+7]=' ,FVCup[3*Nc+13,3*Nc+7]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+7,3*Nc+13]:=FVCup[3*Nc+13,3*Nc+7]*Supr[3*Nc+13]/Supr[3*Nc+7];
writeLn('FVCup[3*Nc+7,3*Nc+13]=' ,FVCup[3*Nc+7,3*Nc+13]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+13,3*Nc+8]:=0;
FVCup[3*Nc+13,3*Nc+7]:=0;
end;
15: begin
fi:=90;
d:=0;
a:=Lc/2;
b:=Hit;
c:=Ac;
b1:=0;
b2:=0;
c1:=(Ac-Am)/2;
c2:=c1;
z:=0;
ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef
FVCup[3*Nc+13,3*Nc+9]:=Suma/(2*pi*Supr[3*Nc+13]);
write('FVCup[3*Nc+13,3*Nc+9]=' ,FVCup[3*Nc+13,3*Nc+9]:7:5);
readln;

```

```

FVCup[3*Nc+9,3*Nc+13]:=FVCup[3*Nc+13,3*Nc+9]*Supr[3*Nc+13]/Supr[3*Nc+9];
writeln('FVCup[3*Nc+9,3*Nc+13]=',FVCup[3*Nc+9,3*Nc+13]:7:5);
readln;
FVCup[3*Nc+13,3*Nc+9]:=0;

```

ANEXA II

```

end;
16: begin
    fi:=90;
    d:=0;
    a:=Lm/2;
    b:=Hit;
    c:=Ac;
    b1:=Hc-Hm-Hvs-Hit;
    b2:=0;
    c1:=(Ac-Am)/2;
    c2:=c1;
    z:=0;
    ScrCoef(coef1,coef2,coef3,coef4,c,c2,c1,a,b,b1,f);
    Suma:=Romberg(fi,d,a,b,c,b1,b2,c1,c2,z,ca,cb,cc,cd,f,g,nmax,jmax,coef1,coef2,coef3,coef4);
    FVCup[3*Nc+13,Nc+1]:=Suma/(2*pi*Supr[3*Nc+13]);
    FVCup[Nc+1,3*Nc+13]:=FVCup[3*Nc+13,Nc+1]*Supr[3*Nc+13]/Supr[Nc+1];
    Write('FVCup[3*Nc+13,Nc+1]=',FVCup[3*Nc+13,Nc+1]:7:5);
    Readln;
    WriteLn('FVCup[Nc+1,3*Nc+13]=',FVCup[Nc+1,3*Nc+13]:7:5);
    Readln;
    FVCup[3*Nc+13,Nc+1]:=0;
end;
17: begin
    for l:=1 to 19 do
corect(l,FVCup);
    end;
end;
end;
SalvCV(FVCup);
end.

```

```

    program Simulare;
($M 32768,0,655360)
{$S-,D-,I-,R-,V-}
{$F+,O+}

uses OVERLAY,DOS,CRT,GRAPH,DATEGEN,Procgen,GRaph2d,TOT2,SIMULCUV,GRAFICX,prosave;
(O PROCGEN)
(o graph2d)
{$o SIMULCUV}
(o SIMULplp)
{$o GRAFICX}
{$o PROSAVE}

var
    Gd, Gm      : integer;
    LoMode, HiMode : integer;
    Gp          : string;
    FontF       : file;
    TriplexFontP : pointer;
    SansSerifFontP : pointer;
    SmallFontP  : pointer;

{ ***** }
{ * Functii si proceduri de uz general * }
{ ***** }

procedure InitEnv;
var
    F : DB_FILE;
    S : string;
    Err_Conv : integer;
begin
    Assign(FontF,'TRIP.CHR');
    Reset(FontF,1);
    if IOResult <> 0 then begin
        writeln('TRIP.CHR negasit. ');
        Halt(1);
    end;
    GetMem(TriplexFontP,FileSize(FontF));
    BlockRead(FontF,TriplexFontP^,FileSize(FontF));
    Close(FontF);
    if RegisterBGIfont(TriplexFontP) < 0 then begin
        writeln('Esec inregistrare TriplexFont');
        halt(1);
    end;
    Assign(FontF,'SANS.CHR');
    Reset(FontF,1);
    if IOResult <> 0 then begin
        writeln('SANS.CHR negasit. ');
        Halt(1);
    end;
    GetMem(SansSerifFontP,FileSize(FontF));
    BlockRead(FontF,SansSerifFontP^,FileSize(FontF));
    Close(FontF);
    if RegisterBGIfont(SansSerifFontP) < 0 then begin
        writeln('Esec inregistrare SansSerifFont');
        halt(1);
    end;
    Assign(FontF,'LITT.CHR');
    Reset(FontF,1);
    if IOResult <> 0 then begin
        writeln('LITT.CHR negasit. ');
        Halt(1);
    end;
    GetMem(SmallFontP,FileSize(FontF));
    BlockRead(FontF,SmallFontP^,FileSize(FontF));
    Close(FontF);
    if RegisterBGIfont(SmallFontP) < 0 then begin
        writeln('Esec inregistrare SmallFont');
        halt(1);
    end;
    Gd := Detect;
    Gp := '';
    if not WInitGraph(Gd,Gm,Gp) then begin
        writeln('Esec initializare mod grafic - Resetati sistemul !');
        halt(1);
    end;
    ClearDevice;
    SetColor(Cyan);
    SetBkColor(Black);
    SetFillStyle(CloseDotFill,Cyan);
    SetTextStyle(TriplexFont,HorizDir,4);
    Bar(0,0,GetMaxX,GetMaxY - TextHeight('X'));
    Rectangle(0,0,GetMaxX,GetMaxY - TextHeight('X'));
    SetColor(yellow);
    SetFillStyle(SolidFill,Black);
    Bar(TextWidth('X'),TextHeight('X') div 3,
        TextWidth('XXTRATERM-PDXX'),2*TextHeight('X'));
    Rectangle(TextWidth('X'),TextHeight('X') div 3,
        TextWidth('XXTRATERM-PDXX'),2*TextHeight('X'));
    OutTextXY(TextWidth('XX'),TextHeight('X') div 2,'TRATERM-PD');
end; {of InitEnv}

procedure SuperProc;

```



```

Oper_Menu : Menu;
Fis_Menu : dBMenu;
Menu_1 : Menu;
Menu_2 : Menu;
Sele_Oper : integer;
Sele_Cupt : integer;
Sele_Proc : integer;
Sele_Fisier : integer;

procedure Simul_Transf;
var
  Scr1 : ScrDiv4;
  i,j : integer;
  FP : text;
  FP_Name : Str20;
  Min,Sec : real;
  Ch : char;
  OK : boolean;

procedure InitDate;
var i,j,k : integer;
begin
  Min := 0;
  Sec := 0;
  Tcup := 0;
  Tsa := 0;
  Tsfi := 0;
  Tsfr := 0;
  Trmax := 0;
  Hvs :=0;
  Epss := 0;
  Epsp := 0;
  Vatm := 0;
  Abatmax := 0;
  Abatmin := 0;
  Ht :=0;
  Hit := 0;
  Tdu := 0;
  Susa :=0;
  Tmen := 0;
  Niter := 0;
  dTimp := 0;
  delta :=0;
  Esantimp:=0;
end;

function DateInit : boolean;
var i,j : integer;
begin
  repeat
  { SetViewPort(0,0,GetMaxX,GetMaxY,ClipOn);
  ClearViewport;
  } Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
  SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
  SetColor(white);
  XText := 2* TextWidth('X');
  YText := 2* TextHeight('X');
  dY := TextHeight('X') div 2;
  OutTextXY(XText,YText,'Temperatura initiala cuptor [gr C]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Temperatura initiala sarja [gr C]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Temperatura finala de incalz.sarja [gr C]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Temperatura finala de racire sarja [gr C]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Abaterea temperaturii max. sarja [gr C]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Abaterea temperaturii min. sarja [gr C]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Temperatura max. de utilizare rezistor [gr C]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Cota de sarjare la nivel de vatra [m] ');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Adincimea de imersie termocuplu [m]');
  if Cuptor.Tip_cuptor='V' then begin
    YText := YText + 3 * dY;
    OutTextXY(XText,YText,'Distanța termocuplului fata de vatra [m]');
  end;
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Suprafata de deschidere usa [mp]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Timp de deschidere usa [min]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Viteza de circulatie atmosfera [m/s]');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Emisivitatea sarjei');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Emisivitatea izolatiei peretelui');
  YText := YText + 3 * dY;
  OutTextXY(XText,YText,'Timp de esantionare - identificare [sec]');
  YText := 2* TextHeight('X');

```

```

XSep := XText + TextWidth('XXXTemperatura max. de utilizare rezistor [gr C]');
XVal := XSep + TextWidth('XX');
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
  Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Tcup,Ch);
  if Ch = Esc then begin
    DateInit := False;
    Exit;
    end;
  if (TCup < 0) or (TCup > 1500) then begin
    SetColor(Black);
    Str(Tcup:6:2,Sir);
    OutTextXY(XVal,YText,Sir);
    SetColor(White);
    Ok := False;
    end;
  until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
  Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Tsa,Ch);
  if Ch = Esc then begin
    DateInit := False;
    Exit;
    end;
  if (Tsa < 0) or (Tsa > 1500) then begin
    SetColor(Black);
    Str(Tsa:6:2,Sir);
    OutTextXY(XVal,YText,Sir);
    SetColor(White);
    Ok := False;
    end;
  until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
  Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Tsfi,Ch);
  if Ch = Esc then begin
    DateInit := False;
    Exit;
    end;
  if (Tsfi < 0) or (Tsfi > 1500) then begin
    SetColor(Black);
    Str(Tsfi:6:2,Sir);
    OutTextXY(XVal,YText,Sir);
    SetColor(White);
    Ok := False;
    end;
  until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
  Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Tsfr,Ch);
  if Ch = Esc then begin
    DateInit := False;
    Exit;
    end;
  if (Tsfr < 0) or (Tsfr > 1500) then begin
    SetColor(Black);
    Str(Tsfr:6:2,Sir);
    OutTextXY(XVal,YText,Sir);
    SetColor(White);
    Ok := False;
    end;
  until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
  Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Abatmax,Ch);
  if Ch = Esc then begin
    DateInit := False;
    Exit;
    end;
  if (Abatmax < 0) or (Abatmax > 100) then begin
    SetColor(Black);
    Str(Abatmax:6:2,Sir);
    OutTextXY(XVal,YText,Sir);
    SetColor(White);
    Ok := False;
    end;
  until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
  Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Abatmin,Ch);
  if Ch = Esc then begin
    DateInit := False;
    Exit;
    end;
  if (Abatmin < 0) or (Abatmin > 20) then begin
    SetColor(Black);
    Str(Abatmin:6:2,Sir);
    OutTextXY(XVal,YText,Sir);
    SetColor(White);
  
```

```
Ok := False;
end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Trmax,Ch);
if Ch = Esc then begin
DateInit := False;
Exit;
end;
if (Trmax < 0) or (Trmax > 1500) then begin
SetColor(Black);
Str(Trmax:6:2,Sir);
OutTextXY(XVal,YText,Sir);
SetColor(White);
Ok := False;
end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Hvs,Ch);
if Ch = Esc then begin
DateInit := False;
Exit;
end;
if (Hvs < 0) or (Hvs > 20) then begin
SetColor(Black);
Str(Hvs:6:2,Sir);
OutTextXY(XVal,YText,Sir);
SetColor(White);
Ok := False;
end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Hit,Ch);
if Ch = Esc then begin
DateInit := False;
Exit;
end;
if (Hit < 0) or (Hit > 1) then begin
SetColor(Black);
Str(Hit:6:2,Sir);
OutTextXY(XVal,YText,Sir);
SetColor(White);
Ok := False;
end;
until Ok;
if Cuptor.Tip_cuptor='V' then begin
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Ht,Ch);
if Ch = Esc then begin
DateInit := False;
Exit;
end;
if (Ht < 0) or (Ht > Cuptor.Dim3) then begin
SetColor(Black);
Str(Ht:6:2,Sir);
OutTextXY(XVal,YText,Sir);
SetColor(White);
Ok := False;
end;
until Ok;
end;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Susa,Ch);
if Ch = Esc then begin
DateInit := False;
Exit;
end;
if (Susa < 0) or (Susa > 2) then begin
SetColor(Black);
Str(Susa:6:2,Sir);
OutTextXY(XVal,YText,Sir);
SetColor(White);
Ok := False;
end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Tdu,Ch);
if Ch = Esc then begin
DateInit := False;
Exit;
end;
if (Tdu < 0) or (Tdu > 30) then begin
```

```

        SetColor(Black);
        Str(Tdu:6:2,Sir);
        OutTextXY(XVal,YText,Sir);
        SetColor(White);
        Ok := False;
    end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Vatm,Ch);
    if Ch = Esc then begin
        DateInit := False;
        Exit;
    end;
    if (Vatm < 0) or (Vatm > 1000) then begin
        SetColor(Black);
        Str(Vatm:6:2,Sir);
        OutTextXY(XVal,YText,Sir);
        SetColor(White);
        Ok := False;
    end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Epss,Ch);
    if Ch = Esc then begin
        DateInit := False;
        Exit;
    end;
    if (Epss < 0) or (Epss > 1) then begin
        SetColor(Black);
        Str(Epss:6:2,Sir);
        OutTextXY(XVal,YText,Sir);
        SetColor(White);
        Ok := False;
    end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Epss,Ch);
    if Ch = Esc then begin
        DateInit := False;
        Exit;
    end;
    if (Epss < 0) or (Epss > 1) then begin
        SetColor(Black);
        Str(Epss:6:2,Sir);
        OutTextXY(XVal,YText,Sir);
        SetColor(White);
        Ok := False;
    end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,6,2,Esantimp,Ch);
    if Ch = Esc then begin
        DateInit := False;
        Exit;
    end;
    if (Esantimp < 0) or (Esantimp > 180) then begin
        SetColor(Black);
        Str(Esantimp:4:0,Sir);
        OutTextXY(XVal,YText,Sir);
        SetColor(White);
        Ok := False;
    end;
until Ok;
until RaspWarn('Ati introdus corect datele [D/N]?') = 'D';
DateInit := True;
end; {of preluare date initiale}

procedure AfiCup_cam;
var Start_X,Start_Y,Stop_X,Stop_Y,Xp1,Xp2,Yp1,Yp2 : real;
    Tabel : ArrPunct20;
    i,k : integer;
begin
    SetLineStyle(SolidLn,0,NormWidth);
    SetViewport(0,0,GetMaxX,GetMaxY,ClipOn);
    ClearViewport;
    Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
    SetViewport(20,20,GetMaxX - 2, GetMaxY - 140, ClipOn);
    ClearViewport;
    Start_X := - 0.5*Lc;
    Stop_X := 1.5*Lc;
    Start_Y := - 0.05*Hc;
    Stop_Y := 1.6*Hc;
    SetGWindow(Start_X,Start_Y,Stop_X,Stop_Y);
    SetLineStyle(CenterLn,0,NormWidth);
    SetColor(green);
    Gline(1.4*Lc/2,Start_Y,1.4*Lc/2,Stop_Y);

```

{fereastra de desenare}

{Scriu axa simetrie}

```

TrasPct (0.2*Lc/2,Yp1,magenta);
TrasText (0.05*Lc/2,Yp1,magenta,'k+4');
Yp1 := 0.25*Hc + (0.2*Hc + Hvs - 0.25*Hc)/2;
TrasPct (0.255*Lc/2,Yp1,magenta);
TrasText (0.255*Lc/2,Yp1,magenta,'k+5');
TrasPct (0.2*Lc/2,Yp1,magenta);
TrasText (0.05*Lc/2,Yp1,magenta,'k+6');
Xp1 := (1.2*Lc-Lm)/4+0.2*Lc/2;
Yp1 := 0.2*Hc +Hvs;
TrasPct (Xp1,Yp1,magenta);
TrasText (Xp1,Yp1,magenta,'k+7');
Yp1 := 0.2*Hc +Hvs+Hm;
TrasPct (Xp1,Yp1,magenta);
TrasText (Xp1,Yp1,magenta,'k+8');
TrasPct (1.4*Lc/2,1.2*Hc,magenta);
TrasText (1.4*Lc/2,1.2*Hc,magenta,'k+9');
Yp1 := 0.2*Hc+Hvs+Hm;
TrasPct (1.4*Lc/2,Yp1,magenta);
TrasText (1.4*Lc/2,Yp1,magenta,'k+10');
TrasPct (1.4*Lc/2,0.2*Hc,magenta);
TrasText (1.4*Lc/2,0.2*Hc,magenta,'k+11');
TrasPct (1.4*Lc/2,0.2*Hc+Hvs,magenta);
TrasText (1.4*Lc/2,0.2*Hc+Hvs,magenta,'k+12');
TrasPct (1.3*Lc/2,1.2*Hc-Hit,magenta);
TrasText (1.3*Lc/2,1.2*Hc-Hit,magenta,'k+13');
{
  SetViewport(20,GetMaxY-138,GetmaxX-20,GetMaxY-45, ClipOn);
  SetColor(yellow);
  OutTextXY(70,50,'APASATI ORICE TASTA PENTRU CONTINUARE');
  readkey;
  Box(40,5,GetMaxX-25,GetMaxY-50,black,SolidFill,Black);
  SetColor(yellow);
  OutTextXY(70,50,'ASTEPTATI EFECTUAREA CALCULELOR');
}
} SetViewport(0,0,GetMaxX,GetMaxY,ClipOn);
end; {of afisare desen cuptor camera cu sarja}

procedure AfiCup_vert;
var   Start_X,Start_Y,Stop_X,Stop_Y,Xp1,Xp2,Yp1,Yp2 : real;
      Tabel : ArrPunct20;
      i,k : integer;
begin
  SetLineStyle(SolidLn,0,NormWidth);
  SetViewport(0,0,GetMaxX,GetMaxY,ClipOn);
  ClearViewport;
  Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
  SetViewport(20,20, GetMaxX - 2, GetMaxY - 140, ClipOn);
  ClearViewport;
  Start_X := - 0.5*Lc;
  Stop_X := 1.5*Lc;
  Start_Y := - 0.05*Hc;
  Stop_Y := 1.6*Hc;
  SetGWindow(Start_X,Start_Y,Stop_X,Stop_Y);
  SetLineStyle(CenterLn,0,NormWidth);
  SetColor(green);
  Gline(1.4*Lc/2,Start_Y,1.4*Lc/2,Stop_Y);
  SetLineStyle(SolidLn,0,NormWidth);
  SetColor(cyan);
  SetFillStyle(InterLeaveFill,Yellow);
  Tabel[1].X := 1.4*Lc/2;
  Tabel[1].Y := 0.2*Hc + Hvs;
  Tabel[2].X := 1.4*Lc/2 - Lm/2;
  Tabel[2].Y := 0.2*Hc + Hvs;
  Tabel[3].X := 1.4*Lc/2 - Lm/2;
  Tabel[3].Y := 0.2*Hc + Hvs + Hm;
  Tabel[4].X := 1.4*Lc/2;
  Tabel[4].Y := 0.2*Hc + Hvs + Hm;
  Tabel[5].X := 1.4*Lc/2;
  Tabel[5].Y := 0.2*Hc + Hvs;
  DFilpoly (Tabel,4);
  SetFillStyle(CloseDotFill, brown);
  Tabel[1].X := 1.4*Lc/2;
  Tabel[1].Y := 0;
  Tabel[2].X := 0;
  Tabel[2].Y := 0;
  Tabel[3].X := 0;
  Tabel[3].Y := 1.4*Hc;
  Tabel[4].X := 1.4*Lc/2-Cuptor.Dim5/2;
  Tabel[4].Y := 1.4*Hc;
  Tabel[5].X := 1.4*Lc/2-Cuptor.Dim5/2;
  Tabel[5].Y := 1.2*Hc;
  Tabel[6].X := 0.2*Lc/2;
  Tabel[6].Y := 1.2*Hc;
  Tabel[7].X := 0.2*Lc/2;
  Tabel[7].Y := 0.2*Hc;
  Tabel[8].X := 1.4*Lc/2;
  Tabel[8].Y := 0.2*Hc;
  Tabel[9].X := 1.4*Lc/2;
  Tabel[9].Y := 0;
  DFilpoly (Tabel,8);
  Tabel[1].X := 1.4*Lc/2;
  Tabel[1].Y := 1.2*Hc;
  Tabel[2].X := 1.4*Lc/2-Cuptor.Dim5/2;
  Tabel[2].Y := 1.2*Hc;
  Tabel[3].X := 1.4*Lc/2-Cuptor.Dim5/2;
  Tabel[3].Y := 1.46*Hc;

```

```

SetLineStyle(SolidLn,0,NormWidth);
SetColor(cyan);
SetFillStyle(InterLeaveFill,Yellow);
Tabel[1].X := 1.4*Lc/2;
Tabel[1].Y := 0.2*Hc + Hvs;
Tabel[2].X := 1.4*Lc/2 - Lm/2;
Tabel[2].Y := 0.2*Hc + Hvs;
Tabel[3].X := 1.4*Lc/2 - Lm/2;
Tabel[3].Y := 0.2*Hc + Hvs + Hm;
Tabel[4].X := 1.4*Lc/2;
Tabel[4].Y := 0.2*Hc + Hvs + Hm;
Tabel[5].X := 1.4*Lc/2;
Tabel[5].Y := 0.2*Hc + Hvs;
DFilpoly (Tabel,4);
SetFillStyle(CloseDotFill, brown);
Tabel[1].X := 1.4*Lc/2;
Tabel[1].Y := 0;
Tabel[2].X := 0;
Tabel[2].Y := 0;
Tabel[3].X := 0;
Tabel[3].Y := 1.4*Hc;
Tabel[4].X := 1.4*Lc/2;
Tabel[4].Y := 1.4*Hc;
Tabel[5].X := 1.4*Lc/2;
Tabel[5].Y := 1.2*Hc;
Tabel[6].X := 0.2*Lc/2;
Tabel[6].Y := 1.2*Hc;
Tabel[7].X := 0.2*Lc/2;
Tabel[7].Y := 0.2*Hc;
Tabel[8].X := 1.4*Lc/2;
Tabel[8].Y := 0.2*Hc;
Tabel[9].X := 1.4*Lc/2;
Tabel[9].Y := 0;
DFilpoly (Tabel,8);
SetLineStyle(SolidLn,0,ThickWidth);
SetColor(lightred);
Gline(0.25*Lc/2,0.25*Hc,0.25*Lc/2,1.15*Hc);
Gline(0.26*Lc/2,0.25*Hc,0.26*Lc/2,1.15*Hc);
SetFillStyle(SolidFill,Lightred);
Tabel[1].X := 1.3*Lc/2;
Tabel[1].Y := 1.2*Hc-Hit;
Tabel[2].X := 1.28*Lc/2;
Tabel[2].Y := 1.2*Hc-Hit;
Tabel[3].X := 1.28*Lc/2;
Tabel[3].Y := 1.18*Hc-Hit;
Tabel[4].X := 1.3*Lc/2;
Tabel[4].Y := 1.18*Hc-Hit;
Tabel[5].X := 1.3*Lc/2;
Tabel[5].Y := 1.2*Hc-Hit;
DFilpoly (Tabel,4);
SetLineStyle(SolidLn,0,NormWidth);
{trasez feliile de sarja}
SetColor(cyan);
Xp1 := 1.4*Lc/2 - Lm/2;
Yp1 := 0.2*Hc + Hvs;
Yp2 := 0.2*Hc + Hvs + Hm;
Case Nrmodel of
  1 : begin
      k := Ncm div 2;
      for i:=1 to k do begin
          Gline(Xp1,Yp1,Xp1,Yp2);
          TrasPct(Xp1,Yp1+Hm/2, magenta);
          Xp1 := Xp1 + LaTri*sqrt(3)/2;
          end;
      end;
  2 : begin
      k := Nplaci div 2 + 1;
      for i:=1 to k do begin
          Gline(Xp1,Yp1,Xp1,Yp2);
          TrasPct(Xp1,Yp1+Hm/2, magenta);
          Xp1 := Xp1 + Wdist;
          end;
      end;
  3 : begin
      k := 3*Ncuve;
      for i:=1 to k do begin
          Gline(Xp1,Yp1,Xp1,Yp2);
          TrasPct(Xp1,Yp1+Hm/2, magenta);
          Xp1 := Xp1 + Wdist;
          end;
      end;
end;
{afisez punctele si numerotatia}
Xp1 := 1.4*Lc/2 - Lm/2;
Yp1 := 0.2*Hc + Hvs + Hm/2;
TrasPct (Xp1,Yp1,magenta);
TrasText (Xp1,Yp1,magenta,'1');
TrasPct (0.255*Lc/2,Yp1,magenta);
TrasText (0.255*Lc/2,Yp1,magenta,'k+1');
TrasPct (0.2*Lc/2,Yp1,magenta);
TrasText (0.05*Lc/2,Yp1,magenta,'k+2');
Yp1 := 1.15*Hc-(1.15*Hc-0.2*Hc-Hvs-Hm)/2;
TrasPct (0.255*Lc/2,Yp1,magenta);
TrasText (0.255*Lc/2,Yp1,magenta,'k+3');

```

```

Tabel[4].X := 1.4*Lc/2;
Tabel[4].Y := 1.46*Hc;
Tabel[5].X := 1.4*Lc/2;
Tabel[5].Y := 1.2*Hc;
DFilpoly (Tabel,4);
SetLineStyle(SolidLn,0,ThickWidth);
SetColor(lightred);
Gline(0.25*Lc/2,0.25*Hc,0.25*Lc/2,1.15*Hc);
Gline(0.26*Lc/2,0.25*Hc,0.26*Lc/2,1.15*Hc);
SetFillStyle(SolidFill,Lightred);
Tabel[1].X := 0.2*Lc/2+Hit;
Tabel[1].Y := 0.2*Hc+Ht;
Tabel[2].X := 0.2*Lc/2+Hit;
Tabel[2].Y := 0.22*Hc+Ht;
Tabel[3].X := 0.22*Lc/2+Hit;
Tabel[3].Y := 0.22*Hc+Ht;
Tabel[4].X := 0.22*Lc/2+Hit;
Tabel[4].Y := 0.2*Hc+Ht;
Tabel[5].X := 0.2*Lc/2+Hit;
Tabel[5].Y := 0.2*Hc+Ht;
DFilpoly (Tabel,4);
SetLineStyle(SolidLn,0,NormWidth);
{afisez punctele si numerotatia}
Xp1 := 1.4*Lc/2 - Lm/2;
Yp1 := 0.2*Hc + Hvs + Hm/2;
TrasPct (Xp1,Yp1,magenta);
TrasText (Xp1,Yp1,magenta,'k+14');
TrasPct (0.255*Lc/2,Yp1,magenta);
TrasText (0.255*Lc/2,Yp1,magenta,'k+1');
TrasPct (0.2*Lc/2,Yp1,magenta);
TrasText (0.05*Lc/2,Yp1,magenta,'k+2');
TrasPct (0.2*Lc/2+Hit,0.2*Hc+Ht,magenta);
TrasText (0.2*Lc/2+Hit,0.2*Hc+Ht,magenta,'k+13');
SetViewPort(0,0,GetMaxX,GetMaxY,ClipOn);
end; {of afisare desen cuptor vertical cu sarja}

Function Ecran : boolean;
var Regl_Menu1 : Menu;
    Regl_Menu2 : Menu;
    Regl_Menu3 : Menu;
    Sele_Regl1 : integer;
    Sele_Regl2 : integer;
    Sele_Regl3 : integer;
Function Afis_Ecran : boolean;
var PSalv : pointer;
begin
X1 := Regl_Menu2.X1+10;
X2 := GetMaxX - 50;
Y1 := Regl_Menu2.Y1+10;
Y2 := GetMaxY - 100;
SaveScreenZone(x1,y1,x2,y2,PSalv);
repeat
Box(x1+1,y1+1,x2-1,y2-1,magenta,SolidFill,Black);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
SetColor(white);
XText := X1+2* TextWidth('X');
YText := Y1+2* TextHeight('X');
dY := TextHeight('X') div 2;
OutTextXY(XText,YText,'Incrementul de timp [sec]');
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XText,YText,'Nr. maxim de iteratii ');
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XText,YText,'Factor precizie iteratii ');
if Fl_mentin=1 then begin
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XText,YText,'Timp de mentinere [ore]');
YText := YText - 3*3 * dY;
end
else
YText := YText - 2*3 * dY;
XSep := XText + TextWidth('XXXTimp de mentinere [ore]');
XVal := XSep + TextWidth('XX');
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
Ok := GetReal(XVal,YText,3,0,dTimp,Ch);
if Ch = Esc then begin
RestoreScreenZone(x1,y1,x2,y2,PSalv);
Afis_Ecran := False;
Exit;
end;
if (dTimp < 0) or (dTimp > 60) then begin
SetColor(Black);
Str(dTimp:3:0,Sir);
OutTextXY(XVal,YText,Sir);
SetColor(White);
Ok := False;
end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,':');
repeat
Ok := GetReal(XVal,YText,4,0,Niter,Ch);
if Ch = Esc then begin
RestoreScreenZone(x1,y1,x2,y2,PSalv);

```

```

        Afis_Ecran := False;
        Exit;
    end;
    if (Niter < 0) or (Niter > 500) then begin
        SetColor(Black);
        Str(Niter:4:0,Sir);
        OutTextXY(XVal,YText,Sir);
        SetColor(White);
        Ok := False;
    end;
until Ok;
YText := YText + 3 * dY;
OutTextXY(XSep,YText,'');
repeat
    Ok := GetReal(XVal,YText,9,7,delta,Ch);
    if Ch = Esc then begin
        RestoreScreenZone(x1,y1,x2,y2,PSalv);
        Afis_Ecran := False;
        Exit;
    end;
    if (delta < 0) or (delta > 0.1) then begin
        SetColor(Black);
        Str(Delta:9:7,Sir);
        OutTextXY(XVal,YText,Sir);
        SetColor(White);
        Ok := False;
    end;
until Ok;
if Fl_mentin=1 then begin
    YText := YText + 3 * dY;
    OutTextXY(XSep,YText,'');
    repeat
        Ok := GetReal(XVal,YText,5,2,Tmen,Ch);
        if Ch = Esc then begin
            RestoreScreenZone(x1,y1,x2,y2,PSalv);
            Afis_Ecran := False;
            Exit;
        end;
        if (Tmen < 0) or (Tmen > 2) then begin
            SetColor(Black);
            Str(Tmen:5:2,Sir);
            OutTextXY(XVal,YText,Sir);
            SetColor(White);
            Ok := False;
        end;
    until Ok;
end;
{ YText := YText -2*3 * dY;
}until RaspWarn('Ati introdus corect datele [D/N]?') = 'D';
Afis_Ecran := True;
RestoreScreenZone(x1,y1,x2,y2,PSalv);
end; {of afisare ecran}

Function Afis_regl : boolean;
begin
    SetFillStyle(CloseDotFill,Cyan);
    with Regl_Menu2 do begin
        Entries_Cnt := 2; Crt_Entry := 1;
        X1 := 90; Y1 := 120;
        Bkg_Color := Cyan; Frg_Color := Black;
        H_Bkg_Color := Red; H_Frg_Color := White;
        Font := TriplexFont;
        Menu_Array[1] := ' Cu reglaj dupa temp SARJA  ';
        Menu_Array[2] := ' Cu reglaj dupa temp CUPTOR  ';
    end;
    Prompt(Regl_Menu2,True);
    repeat
        Sele_Regl2 := MenuTo(Regl_Menu2);
        case Sele_Regl2 of
            1 : begin
                Fl_reglaj := 1;                (regl dupa temp sarja)
                with Regl_Menu2 do
                    RestoreScreenZone(x1-1,y1-1,x2+1,y2+1,P_Save);
                Afis_regl := true;
                Exit;
            end;
            2 : begin
                Fl_reglaj := 0;                (regl dupa temp Cuptor)
                with Regl_Menu2 do
                    RestoreScreenZone(x1-1,y1-1,x2+1,y2+1,P_Save);
                Afis_regl := true;
                Exit;
            end;
        end;
    until Sele_Regl2 = 0;
    Afis_regl := false;
    with Regl_Menu2 do
        RestoreScreenZone(x1-1,y1-1,x2+1,y2+1,P_Save);
    end; {of afisare reglare}

Function Afis_rac : boolean;
begin
    SetFillStyle(CloseDotFill,Cyan);

```



```

with Regl_Menu3 do begin
  Entries_Cnt := 2; Crt_Entry := 1;
  X1 := 90; Y1 := 120;
  Bkg_Color := Cyan; Frg_Color := Black;
  H_Bkg_Color := Red; H_Frg_Color := White;
  Font := TriplexFont;
  Menu_Array[1] := ' Cu regim de racire  ';
  Menu_Array[2] := ' Fara regim de racire  ';
end;
Prompt(Regl_Menu3,True);
repeat
  Sele_Regl3 := MenuTo(Regl_Menu3);
  case Sele_Regl3 of
    1 : begin
      Fl_racire := 1;
      with Regl_Menu3 do
        RestoreScreenZone(x1-1,y1-1,x2+1,y2+1,P_Save);
        Afis_rac := true;
        Exit;
      end;
    2 : begin
      Fl_racire := 0;
      with Regl_Menu3 do
        RestoreScreenZone(x1-1,y1-1,x2+1,y2+1,P_Save);
        Afis_rac := true;
        Exit;
      end;
    end;
  until Sele_Regl3 = 0;
  Afis_rac := false;
  with Regl_Menu3 do
    RestoreScreenZone(x1-1,y1-1,x2+1,y2+1,P_Save);
end; (of afisare racire)

begin
  SetFillStyle(CloseDotFill,Cyan);
  with Regl_Menu1 do begin
    Entries_Cnt := 2; Crt_Entry := 1;
    X1 := 50; Y1 := 100;
    Bkg_Color := Cyan; Frg_Color := Black;
    H_Bkg_Color := Red; H_Frg_Color := White;
    Font := TriplexFont;
    Menu_Array[1] := ' Cu timp de mentinere  ';
    Menu_Array[2] := ' Fara timp de mentinere  ';

    end;
  Prompt(Regl_Menu1,True);
  repeat
    Sele_Regl1 := MenuTo(Regl_Menu1);
    case Sele_Regl1 of
      1 : begin
        Fl_mentin := 1;
        if Afis_regl then
          if Afis_rac then
            if Afis_ecran then begin
              with Regl_Menu1 do
                RestoreScreenZone(x1-1,y1-1,x2+1,y2+1,P_Save);
              exit;
            end;
          end;
        2 : begin
          Fl_mentin := 0; (flag pt timp de mentinere fara =0, cu =1)
          if Afis_regl then
            if Afis_rac then
              if Afis_ecran then begin
                with Regl_Menu1 do
                  RestoreScreenZone(x1-1,y1-1,x2+1,y2+1,P_Save);
                exit;
              end;
            end;
          end;
        until Sele_Regl1 = 0;
        with Regl_Menu1 do
          RestoreScreenZone(x1-1,y1-1,x2+1,y2+1,P_Save);
        end; (end of preluare date ekran)

begin
  if not SortDate then begin
    RestoreCrtMode;
    Write('Fisierele de date(modelare) nu se pot deschide corect');
    halt(1);
    end;
  InitDate;
  SaveScreen(Scr1);
  Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
  if not DateInit then begin
    RestoreScreen(Scr1);
    exit;
  end;
  Ecran;

```

```

If Cuptor.Tip_cuptor='C' then begin
  Hc := Cuptor.Dim1;
  Ac := Cuptor.Dim2;
  Lc := Cuptor.Dim3;
  AfiCup_cam;
end
else begin
  Lc := Cuptor.Dim1;
  Hc := Cuptor.Dim3;
  AfiCup_vert;
end;
readkey;

Case NrModel of
  1: exit;(Calc_tri(Cuptor,Rez,Min,Sec));
  2: Calc_plc(Cuptor,Rez,Min,Sec);
  3: Calc_cuv(Cuptor,Rez,Min,Sec);
  4: exit;(Calc_unic(Cuptor,Rez,Min,Sec); )
end;

RestoreScreen(Scr1);

repeat
  Afis_graf(Min,Sec,Scr1);
until readkey=esc;

end; {of simulare}

begin
  Randomize;
  SetFillStyle(CloseDotFill,Cyan);
  with Oper_Menu do begin
    Entries_Cnt := 2; Crt_Entry := 1;
    X1 := GetMaxX div 20; Y1 := GetMaxY div 6;
    Bkg_Color := Cyan; Frg_Color := Black;
    H_Bkg_Color := Red; H_Frg_Color := White;
    Font := TriplexFont;
    Menu_Array[1] := ' Calcul FactVed ';
    Menu_Array[2] := ' Simulare proces ';
    { Menu_Array[3] := ' Trasare grafice ';}
  end;
  Prompt(Oper_Menu,True);
  repeat
    Sele_Oper := MenuTo(Oper_Menu);
    case Sele_Oper of
      1 : exit;
      2 : Simul transf;
      3 : Afis_graf(var Ctmin,Ctsec : real;var PSW:ScrDiv4);
    }
  end;
until Sele_Oper = 0;
with Oper_Menu do
  RestoreScreenZone(x1-1,y1-1,x2+1,y2+1,P_Save);
end; {of SuperProc}

begin
  InitEnv;
  repeat
    SuperProc;
  until ReadKey = Esc;
  RestoreCrtMode;
end.

```

```
{S+,F+}
unit SIMULCUV;
{$S-,I-,R-,D-,V-,N+}
interface
```

ANEXA II

```
uses CRT,DOS,GRAPH,DATEGEN,PROCGEN,Prosave ;
```

```
procedure Calc_cuv(var Cuptor:dCuptor;var REZ:dRezist; var Cont_Min,Cont_Sec : real);
```

```
implementation
```

```
procedure Calc_cuv(var Cuptor:dCuptor;var REZ:dRezist; var Cont_Min,Cont_Sec : real);
var Eac,Manqell,Manqel,Manev1,Manev2 : real;
```

```
Contor,Nc,Nc2,Nc3 : integer;
Trix : boolean;
Tablou : array [1..10] of real;
Deltatab : array [1..9] of real;
Ggp,abucla,bbucla,zl,mm,ro,Ke,Ki,Kd,Kr,ale,a2e,ble,b2e,ple,p2e : real;
E1,E2,E3,F1,F2,F3,SS1,SS2,UU1,UU2,TE1,TE2,OMEGA0,PSI,Fif : real;
Savfact1,Savfact2,Savfact3,Factor,Cont_zeci,Cont_sute,Savtmin,Savtsec,SavTecup,SavTesarj: real;
Ocolflag,Factemp,Factqel,Factqell,Factu : byte;
FP : text;
FP_Name : Str20;
Man_Ti : Supraf;
FLux_rezid : Supraf;
TETA_cup : Supraf;
RAD_cup : Supraf;
FVCup : FactFV;
```

```
procedure Initializ;
```

```
var i,j : integer;
```

```
begin
```

```
for i:=1 to 45 do begin
  Supr[i] := 0;
  Epsil[i] := 0;
  TETA_Cup[i] := 0;
  Man_Ti[i] := 0;
  FLux_rezid[i] := 0;
end;
for i:=1 to 35 do begin
  for j:=1 to 35 do begin
    FVCup[i,j] := 0;
  end;
end;
Nc:=Ncuve;
Nc2:= 2*Ncuve;
Nc3:= 3*Ncuve;
Factu := 1;
Factqel := 1;
Factemp := 1;
Cont_sec := 0;
Cont_sute := 0;
Cont_zeci := 0;
Cont_min := 0;
Savtmin := 0;
Savtsec := 0;
SavTecup := Tcup;
SavTesarj := Tsa;
Man_Ti[Nc3+13] := Tcup;
Man_Ti[1] := Tsa;
Pcu := 0;
EAc := 0;
Manev2:=0;
Manev1:=0;
Savfact1:=0;
Savfact2:=0;
Savfact3:=0;
```

```
end;
```

```
procedure Calcinitial;
```

```
var i,j,k : integer;
```

```
begin
```

```
{ temperaturi initiale in cuptor si sarja si fictiv}
for i:=1 to Nc3 do
  TETA_Cup[i] := Tsa;
k := Nc3;
Ra := 10*1000000*Tauc/(5.67*Epsr*Frp);
Rb := (Tcup+273)*(Tcup+273)*(Tcup+273)*(Tcup+273);
TETA_cup[k+1] := sqrt(sqrt(Ra+Rb))-273;
TETA_cup[k+3] := TETA_Cup[k+1];
TETA_cup[k+5] := TETA_Cup[k+1];
TETA_cup[k+2] := Tcup;
TETA_cup[k+4] := Tcup;
TETA_cup[k+6] := Tcup;
TETA_cup[k+7] := Tcup;
TETA_cup[k+8] := Tcup;
TETA_cup[k+9] := Tcup;
TETA_cup[k+10] := 0;
TETA_cup[k+11] := Tcup;
TETA_cup[k+12] := 0;
TETA_cup[k+13] := Tcup;
TETA_cup[k+14] := Tcup;(Sa);
TETA_cup[k+15] := Tcup;(Sa);
for i:=1 to Nc3 do
```

```

        EPsil[i] := Epss;
        k:= Nc3;
        EPsil[k+1] := Epsr;
        EPsil[k+3] := Epsr;
        EPsil[k+5] := Epsr;
        EPsil[k+2] := Epsp;
        EPsil[k+4] := Epsp;
        EPsil[k+6] := Epsp;
        EPsil[k+9] := Epsp;
        EPsil[k+11] := Epsp;
        EPsil[k+13] := Epss;
        EPsil[k+7] := Epsr;
        EPsil[k+8] := Epsp;
        EPsil[k+10] := 1;
        EPsil[k+12] := 1;
    for i:=1 to Nc do
        Supr[i]:= Am *(Hm-(i-1)*(Gros+Wdist)*0.002);
    for i:=1 to Nc do
        Supr[Nc+i]:= Am*(Lm/2-(i-1)*(Gros+Wdist)*0.001);
    for i:=1 to Nc do
        Supr[Nc2+i] := Am*(Lm/2-(i-1)*(Gros+Wdist)*0.001);
    Supr[Nc3+2]:=Hc*Ac;
    Supr[Nc3+1]:=(pi*Rez.de*Supr[Nc3+2])/Rez.pas;
    Supr[Nc3+4]:=Lc*Ac*(Hc-Hm-Hvs)/Lm;
    Supr[Nc3+3]:=(pi*Rez.de*Supr[Nc3+4])/Rez.pas;
    Supr[Nc3+6]:=Lc*Ac*Hvs/Lm;
    Supr[Nc3+5]:=(pi*Rez.de*Supr[Nc3+6])/Rez.pas;
    Supr[Nc3+8]:=Ac*(Hc-Hm-Hvs);
    Supr[Nc3+7]:=(pi*Rez.de*Supr[Nc3+8])/Rez.pas;
    Supr[Nc3+9]:=Lc*Ac/2;
    Supr[Nc3+11]:=Supr[Nc3+9];
    Supr[Nc3+13]:=Hit*Am;

end;
{of calculul initial temperaturi si reactante}

Procedure Salv_init;
begin
    FP_Name := 'Templuc.TMP';
    Assign(FP,FP_Name);
    rewrite(FP);
    if IOResult <> 0 then begin
        DispWarn(FP_Name + ' - nu poate fi deschis in conditii bune');
        Exit;
        halt(1);
    end;
    WriteLn (FP,' INTEC S. A.- Fil.SIBIU - date de lucru');
    Str(Cont_min:6:0,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Tmen:8:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Tcup:8:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(TSa:8:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Tsfi:8:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Tsfr:8:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Abatmax:8:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Abatmin:8:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Trmax:8:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Pcu:8:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Close(FP);
end;

procedure Salv_date;
begin
    Append(FP);
    Str(Cont_min:6:0,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Manev2:6:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Manev1:6:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(TETA_Cup[Nc3+13]:6:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(TETA_Cup[Nc3+1]:6:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(Manqel:6:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Str(EAc:6:2,Sir);
    Writeln(FP,Sir);
    Close(FP);
end; { salvare date in fisier}
procedure Calcule(n1,n2,n3:integer);
var i,j :integer;
    Flrez,Man1,Man2,sum,sum1:real;

```

```

begin
sum:=0;
suml:=0;
SavTecu := Man_Ti[n3+13];
SavTesarj := Man_Ti[n1+1];
for i:=1 to n3+15 do begin {n=3*Ncuve}
Man_Ti[i] := TETA_Cup[i];
end;

Rb:= (2.3+195*sqrt((1-Factu)*Vatm/Man_Ti[n3+13]))/1000;
{ Rb:=0;}

Man_Ti[1]:= Man_Ti[1]+273;
Ra:= (Sigma*Man_Ti[1]*Man_Ti[1]*Man_Ti[1]-Rad_Cup[1])*Supr[1]*Epsil[1]/(1-Epsil[1]);
Man1:=(2*FVCup[n3+1,1]-Supr[n3+1]*(FVCup[n3+1,1]*FVCup[n3+1,1])/Supr[n3+2])*(Rad_cup[n3+1]-Rad_cup[1])*Supr[1];
Man2:=Man1+FVCup[2,1]*Supr[2]*(Rad_cup[2]-Rad_cup[1]);
FLUX_rezid[1]:=Man2-Rb*Supr[1]*(Man_Ti[1]-Man_Ti[n3+13]);
Man_Ti[1]:= Man_Ti[1]-273;

Man_Ti[n1]:=Man_Ti[n1]+273;
Ra:= (Sigma*Man_Ti[n1]*Man_Ti[n1]*Man_Ti[n1]-Rad_Cup[n1])*Supr[n1]*Epsil[n1]/(1-Epsil[n1]);
Man1:=FVCup[n1-1,n1]*Supr[n1-1]*(Rad_cup[n1-1]-Rad_cup[n1]);
Man2:=Man1+FVCup[n2,n1]*Supr[n2]*(Rad_cup[n2]-Rad_cup[n1])-Rb*Supr[n1]*(Man_Ti[n1]-Man_Ti[n3+13]);
FLUX_rezid[n1]:=Man2+FVCup[n3,n1]*Supr[n3]*(Rad_cup[n3]-Rad_cup[n1]);
Man_Ti[n1]:=Man_Ti[n1]-273;

for i:=2 to n1-1 do begin
Man_Ti[i]:=Man_Ti[i]+273;
Ra:= (Sigma*Man_Ti[i]*Man_Ti[i]*Man_Ti[i]-Rad_Cup[i])*Supr[i]*Epsil[i]/(1-Epsil[i]);
Man1:=FVCup[i+1,i]*Supr[i+1]*(Rad_cup[i+1]-Rad_cup[i]);
Man2:=FVCup[i-1,i]*Supr[i-1]*(Rad_cup[i-1]-Rad_cup[i]);
FLUX_rezid[i]:=Man1+Man2-Rb*Supr[i]*(Man_Ti[i]-Man_Ti[n3+13])/4;
Man_Ti[i]:=Man_Ti[i]-273;
end;
Man_Ti[n1+1]:= Man_Ti[n1+1]+273;
Ra:= (Sigma*Man_Ti[n1+1]*Man_Ti[n1+1]*Man_Ti[n1+1]-Rad_Cup[n1+1])*Supr[n1+1]*Epsil[n1+1]/(1-Epsil[n1+1]);
Man1:=2*FVCup[n3+7,n1+1]-Supr[n3+7]*(FVCup[n3+7,n1+1]*FVCup[n3+7,n1+1])/Supr[n3+8];
Man2:=Man1+Man2*(Rad_cup[n3+7]-Rad_cup[n1+1])*Supr[n3+7]+FVCup[n3+9,n1+1]*Supr[n3+9]*(Rad_cup[n3+9]-Rad_cup[n1+1]);
FLUX_rezid[n1+1]:=Man1-Rb*Supr[n1+1]*(Man_Ti[n1+1]-Man_Ti[n3+13]);
Man_Ti[n1+1]:= Man_Ti[n1+1]-273;

Man_Ti[n2]:=Man_Ti[n2]+273;
Ra:= (Sigma*Man_Ti[n2]*Man_Ti[n2]*Man_Ti[n2]-Rad_Cup[n2])*Supr[n2]*Epsil[n2]/(1-Epsil[n2]);
Man1:=FVCup[n2-1,n2]*Supr[n2-1]*(Rad_cup[n2-1]-Rad_cup[n2]);
Man2:=Man1+FVCup[n1,n2]*Supr[n1]*(Rad_cup[n1]-Rad_cup[n2])-Rb*Supr[n2]*(Man_Ti[n2]-Man_Ti[n3+13])/4;
FLUX_rezid[n2]:=Man2+FVCup[n3,n2]*Supr[n3]*(Rad_cup[n3]-Rad_cup[n2]);
Man_Ti[n2]:=Man_Ti[n2]-273;

for i:=n1+2 to n2-1 do begin
Man_Ti[i]:=Man_Ti[i]+273;
Ra:= (Sigma*Man_Ti[i]*Man_Ti[i]*Man_Ti[i]-Rad_Cup[i])*Supr[i]*Epsil[i]/(1-Epsil[i]);
Man1:=FVCup[i+1,i]*Supr[i+1]*(Rad_cup[i+1]-Rad_cup[i]);
Man2:=FVCup[i-1,i]*Supr[i-1]*(Rad_cup[i-1]-Rad_cup[i]);
FLUX_rezid[i]:=Man1+Man2-Rb*Supr[i]*(Man_Ti[i]-Man_Ti[n3+13])/4;
Man_Ti[i]:=Man_Ti[i]-273;
end;

Man_Ti[n2+1]:= Man_Ti[n2+1]+273;
Ra:= (Sigma*Man_Ti[n2+1]*Man_Ti[n2+1]*Man_Ti[n2+1]-Rad_Cup[n2+1])*Supr[n2+1]*Epsil[n2+1]/(1-Epsil[n2+1]);
Man1:=FVCup[n2+2,n2+1]*Supr[n2+2]*(Rad_cup[n2+2]-Rad_cup[n2+1]);
Man2:=(2*FVCup[n3+5,n2+1]-Supr[n3+5]*(FVCup[n3+5,n2+1]*FVCup[n3+5,n2+1])/Supr[n3+6])*(Rad_cup[n3+5]-Rad_cup[n2+1]);
Man1:=Man1+Man2*Supr[n3+5]; (+FVCup[n3+11,n2+1]*Supr[n3+11]*(Rad_cup[n3+11]-Rad_cup[n2+1])/2);
FLUX_rezid[n2+1]:=Man1-Rb*Supr[n2+1]*(Man_Ti[n2+1]-Man_Ti[n3+13]);
Man_Ti[n2+1]:= Man_Ti[n2+1]-273;

Man_Ti[n3]:=Man_Ti[n3]+273;
Ra:= (Sigma*Man_Ti[n3]*Man_Ti[n3]*Man_Ti[n3]-Rad_Cup[n3])*Supr[n3]*Epsil[n3]/(1-Epsil[n3]);
Man1:=FVCup[n3-1,n3]*Supr[n3-1]*(Rad_cup[n3-1]-Rad_cup[n3]);
Man2:=Man1+FVCup[n1,n3]*Supr[n1]*(Rad_cup[n1]-Rad_cup[n3]); (-Rb*Supr[n3]*(Man_Ti[n3]-Man_Ti[n3+13])/4);
FLUX_rezid[n3]:=Man2+FVCup[n2,n3]*Supr[n2]*(Rad_cup[n2]-Rad_cup[n3]);
Man_Ti[n3]:=Man_Ti[n3]-273;

for i:=n2+2 to n3-1 do begin
Man_Ti[i]:=Man_Ti[i]+273;
Ra:= (Sigma*Man_Ti[i]*Man_Ti[i]*Man_Ti[i]-Rad_Cup[i])*Supr[i]*Epsil[i]/(1-Epsil[i]);
Man1:=FVCup[i+1,i]*Supr[i+1]*(Rad_cup[i+1]-Rad_cup[i]);
Man2:=FVCup[i-1,i]*Supr[i-1]*(Rad_cup[i-1]-Rad_cup[i]);
FLUX_rezid[i]:=Man1+Man2-Rb*Supr[i]*(Man_Ti[i]-Man_Ti[n3+13])/4;
Man_Ti[i]:=Man_Ti[i]-273;
end;

Qel := Rez.Nelin*Urrez*Urrez/(R20*(1+(TETA_Cup[n3+1]-20)*Alfarez)*1000);
Manqell :=(1-Factu)*Factqell*Factqel*Qel/2;
Manqel := Manqell*2;
EAC := EAC + dTimp*Manqel/3600;

{calculul conductantei cuptorului}

Man_Ti[n3+1]:=Man_Ti[n3+1]+273;
Ra:=Man_Ti[n3+1]*Man_Ti[n3+1]*Man_Ti[n3+1]*Man_Ti[n3+1];
Qdu :=Factu*Sigma*Epsp*Susa*(Ra-(Tsa+273)*(Tsa+273)*(Tsa+273)*(Tsa+273));

```

```

Ra := (Sigma*Man_Ti[n3+1]*Man_Ti[n3+1]*Man_Ti[n3+1]*Man_Ti[n3+1]-Rad_Cup[n3+1])*Supr[n3+1]*Epsil[n3+1]/(1-
Man1:=FVCup[1,n3+1]*Supr[1]*(Rad_cup[1]-Rad_cup[n3+1])+FVCup[n3+2,n3+1]*Supr[n3+2]*(Rad_cup[n3+2]-Rad_cup[
FLUX_rezid[n3+1]:=Manqell+Man1-Qdu;
Man_Ti[n3+1]:=Man_Ti[n3+1]-273;

Pcu := Cuptor.Po*exp(cuptor.Ar*ln(Man_Ti[n3+2]/Cuptor.Ta-1));
Ggp:=Pcu/((Man_Ti[n3+2]-Cuptor.Ta)*Cuptor.Sech);

Man_Ti[n3+2]:=Man_Ti[n3+2]+273;
Ra:=Man_Ti[n3+2]*Man_Ti[n3+2]*Man_Ti[n3+2]*Man_Ti[n3+2];
Qdu :=Factu*Sigma*Epsp*Susa*(Ra-(Tsa+273)*(Tsa+273)*(Tsa+273)*(Tsa+273));
Man2:=FVCup[n3+1,n3+2]*Supr[n3+1]*(Rad_cup[n3+1]-Rad_cup[n3+2])+FVCup[1,n3+2]*Supr[1]*(Rad_cup[1]-Rad_cup[
Man_Ti[n3+2]:=Man_Ti[n3+2]-273;
Man1:=Ggp*Supr[n3+2]*(Man_Ti[n3+2]-Cuptor.Ta);
FLUX_rezid[n3+2]:=Man2-Qdu-Man1;

Man_Ti[n3+9]:=Man_Ti[n3+9]+273;
Ra:=Man_Ti[n3+9]*Man_Ti[n3+9]*Man_Ti[n3+9]*Man_Ti[n3+9];
Qdu :=Factu*Sigma*Epsp*Susa*(Ra-(Tsa+273)*(Tsa+273)*(Tsa+273)*(Tsa+273));
Ra:=(Sigma*Man_Ti[n3+9]*Man_Ti[n3+9]*Man_Ti[n3+9]*Man_Ti[n3+9]-Rad_Cup[n3+9])*Supr[n3+9]*Epsil[n3+9]/(1-Ep
Man1:=FVCup[n3+3,n3+9]*Supr[n3+3]*(Rad_cup[n3+3]-Rad_cup[n3+9])+FVCup[n3+4,n3+9]*Supr[n3+4]*(Rad_cup[n3+4]
Man2:=FVCup[n1+1,n3+9]*Supr[n1+1]*(Rad_cup[n1+1]-Rad_cup[n3+9]);
FLUX_rezid[n3+9]:=Man1+Man2-Qdu-Ggp*Supr[n3+9]*(Man_Ti[n3+9]-Cuptor.Ta);
Man_Ti[n3+9]:=Man_Ti[n3+9]-273;

Man_Ti[n3+11]:=Man_Ti[n3+11]+273;
Ra:=Man_Ti[n3+11]*Man_Ti[n3+11]*Man_Ti[n3+11]*Man_Ti[n3+11];
Qdu :=Factu*Sigma*Epsp*Susa*(Ra-(Tsa+273)*(Tsa+273)*(Tsa+273)*(Tsa+273));
Ra:=(Sigma*Man_Ti[n3+11]*Man_Ti[n3+11]*Man_Ti[n3+11]*Man_Ti[n3+11]-Rad_Cup[n3+11])*Supr[n3+11]*Epsil[n3+11]
Man1:=FVCup[n3+5,n3+11]*Supr[n3+5]*(Rad_cup[n3+5]-Rad_cup[n3+11]);
Man2:=Man1+FVCup[n2+1,n3+11]*Supr[n2+1]*(Rad_cup[n2+1]-Rad_cup[n3+11]);
Man1:=FVCup[n3+6,n3+11]*Supr[n3+6]*(Rad_cup[n3+6]-Rad_cup[n3+11]);
FLUX_rezid[n3+11]:=Man1+Man2-Qdu-Ggp*Supr[n3+11]*(Man_Ti[n3+11]-Cuptor.Ta);
Man_Ti[n3+11]:=Man_Ti[n3+11]-273;

Ra :=FVCup[n3+13,n1+1]*Supr[n3+13]*(Rad_cup[n3+13]-Rad_cup[n1+1]);
Man1:=FVCup[n3+13,n3+7]*Supr[n3+13]*(Rad_cup[n3+13]-Rad_cup[n3+7]);
Man2:=Man1+FVCup[n3+13,n3+9]*Supr[n3+13]*(Rad_cup[n3+13]-Rad_cup[n3+9]);
Man1:=FVCup[n3+13,n3+8]*Supr[n3+13]*(Rad_cup[n3+13]-Rad_cup[n3+8]);
FLUX_rezid[n3+13]:=Ra+Man1+Man2;

( Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
SetColor(white);
XText := 2* TextWidth('X');
YText := 2* TextHeight('X');
dY := TextHeight('X') div 2;
YText := YText + 3 * dY;
str(FVCup[n3+7,n1+1]:10:5,Sir);
OutTextXY(XText,YText,'Fvcup 7,1 '+Sir);
YText := YText + 3 * dY;
str(FVCup[n3+5,n2+1]:10:5,Sir);
OutTextXY(XText,YText,'Fvcup 5,2 '+Sir);
YText := YText + 3 * dY;
str(FVCup[n3+1,1]:10:5,Sir);
OutTextXY(XText,YText,'Fvcup 1,1 '+Sir);
YText := YText + 3 * dY;
readkey;

for i:=1 to n1 do begin
str(Flux_rezid[i]:10:5,Sir);
str(i:2,S);
OutTextXY(XText,YText,'Flux rezidual '+S+' '+Sir);
YText := YText + 3 * dY;
end;
readkey;
for i:=n1-1 to n2 do begin
str(Flux_rezid[i]:10:5,Sir);
str(i:2,S);
OutTextXY(XText,YText,'Flux rezidual '+S+' '+Sir);
YText := YText + 3 * dY;
end;
readkey;
for i:=n2-1 to n3 do begin
str(Flux_rezid[i]:10:5,Sir);
str(i:2,S);
OutTextXY(XText,YText,'Flux rezidual '+S+' '+Sir);
YText := YText + 3 * dY;
end;
readkey;
for i:=n3-1 to 15 do begin
str(Flux_rezid[i]:10:5,Sir);
str(i:2,S);
OutTextXY(XText,YText,'Flux rezidual '+S+' '+Sir);
YText := YText + 3 * dY;
end;
readkey;
}
{+++++}

for i := 1 to n1 do begin
Ra := Dens*((Hm-2*(i-1)*(Wdist+Gros)/1000)*Am*Gros/1000);

```

```

Rb := Co*(1+Beta*Man_Ti[i]/1000)/1000;
Man2:= Ra * Rb;
TETA_cup[i] := Man_Ti[i] + dTimp*FLUX_rezid[i]/(Man2*3600);
end;

for i := n1+1 to n2 do begin
  Ra := Dens*((Lm/2-(i-1)*(Wdist+Gros)/1000)*Am*Gros/1000);
  Rb := Co*(1+Beta*Man_Ti[i]/1000)/1000;
  Man2:= Ra * Rb;
  TETA_cup[i] := Man_Ti[i] + dTimp*FLUX_rezid[i]/(Man2*3600);
end;
for i := n2+1 to n3 do begin
  Ra := Dens*((Lm/2-(i-1)*(Wdist+Gros)/1000)*Am*Gros/1000);
  Rb := Co*(1+Beta*Man_Ti[i]/1000)/1000;
  Man2:= Ra * Rb;
  TETA_cup[i] := Man_Ti[i] + dTimp*FLUX_rezid[i]/(Man2*3600);
end;

Man2 := Crez/2;
TETA_cup[n3+1] := Man_Ti[n3+1] + dTimp*FLUX_rezid[n3+1]/(Man2*3600);
TETA_cup[n3+3] := TETA_cup[n3+1];
TETA_cup[n3+5] := TETA_cup[n3+1];
TETA_cup[n3+7] := TETA_cup[n3+1];

Man2 := Cuptor.Capa_per[1];
TETA_cup[n3+2] := Man_Ti[n3+2] + dTimp*FLUX_rezid[n3+2]/(Man2*3600);
TETA_cup[n3+4] := TETA_cup[n3+2];
TETA_cup[n3+6] := TETA_cup[n3+2];
TETA_cup[n3+8] := TETA_cup[n3+2];

Man2 := Cuptor.Capa_per[3]/2;
TETA_cup[n3+9] := Man_Ti[n3+9] + dTimp*FLUX_rezid[n3+9]/(Man2*3600);

Man2 := Cuptor.Capa_per[4]/2;
TETA_cup[n3+11] := Man_Ti[n3+11] + dTimp*FLUX_rezid[n3+11]/(Man2*3600);

TETA_cup[n3+13] := sqrt(sqrt(RAD_Cup[n3+13]/Sigma))-273;

  Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
  SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
  SetColor(white);
  XText := 2* TextWidth('X');
  YText := 2* TextHeight('X');
  dY := TextHeight('X') div 2;
  str(TETA_Cup[n3+7]:10:5,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'TEMP n7      :'+Sir);
  YText := YText + 3 * dY;
  str(TETA_Cup[n3+8]:10:5,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'TEMP n8      :'+Sir);
  YText := YText + 3 * dY;
  str(TETA_Cup[n3+9]:10:5,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'TEMP n9      :'+Sir);
  YText := YText + 3 * dY;
  str(RAD_Cup[n3+13]:10:5,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'radi      :'+Sir);
  YText := YText + 3 * dY;
  readkey;

}                                     {temperatura masurata}
Ra :=(TETA_Cup[n3+13]+273/1000);
Man1 :=Ra*Ra*Ra*Ra;
Man2 :=FLUX_rezid[n3+13]/(2.7*Hit);

TETA_Cup[n3+14] :=sqrt(sqrt(Man1-Man2))-273;
                                     {temperatura atmosfera}
Ra := (TETA_Cup[n3+13]+273)/1000;
Rb := (TETA_Cup[n3+14]+273)/1000;
Man1 := Ra*Ra*Ra*Ra-Rb*Rb*Rb*Rb;
Man2 := 1350*Hit*Man1/(2.3+155*sqrt(Vatm/(TETA_Cup[n3+14]+273)));
TETA_Cup[n3+15] :=TETA_Cup[n3+13]-Man2;

  Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
  SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
  SetColor(white);
  XText := 2* TextWidth('X');
  YText := 2* TextHeight('X');
  dY := TextHeight('X') div 2;

  str(TETA_Cup[1]:10:5,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'TEMP Sarja pl.1 :'+Sir);
  YText := YText + 3 * dY;
  str(TETA_Cup[2]:10:5,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'TEMP 2      :'+Sir);
  YText := YText + 3 * dY;
  str(TETA_Cup[n1]:10:5,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'TEMP nc      :'+Sir);
  YText := YText + 3 * dY;
  str(TETA_Cup[n1+1]:10:5,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'TEMP nc+1 :'+Sir);
  YText := YText + 3 * dY;
  str(TETA_Cup[n2]:10:5,Sir);

```

```

    OutTextXY(XText,YText,'TEMP nc2, :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    str(TETA_Cup[n2+1]:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'TEMP nc2+1 :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    str(TETA_Cup[n3]:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'TEMP nc3, :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    YText := YText + 3 * dY;
    YText := YText + 3 * dY;
    str(TETA_Cup[n3+1]:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'TEMP Rezistor :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    str(TETA_Cup[n3+2]:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'TEMP Perete lateral:'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    str(TETA_Cup[n3+14]:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'TEMP termocuplu :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    YText := YText + 3 * dY;
    str(Manqel:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'Manqel :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;

end; {of calcule}

procedure ScrTemp(var n,nl,l:integer);
begin
    if Fl_reglaj=1 then
        Tablou[l] := TETA_Cup[n+13]
    else
        Tablou[l] := TETA_Cup[n+13];
    end;
end;

function Calc_fact_el(N,nl: integer):real;
var fil,Pb0,Pb1,Pb2,Pa1,Pa2:real;
begin
    fil:= (1+abucla+bbucla*z1+z1)/(1-z1);
    Pb0:= Kr*(1-fil)*(1+Ki+kd);
    Pb1:= -Kr*(1-fil)*(1+2*Kd);
    Pb2:= Kr*Kd*(1-fil);
    Pa1:= -1-fil;
    Pa2:= fil;

    Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
    SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
    SetColor(white);
    XText := 2* TextWidth('X');
    YText := 2* TextHeight('X');
    dY := TextHeight('X') div 2;

{
    str(fil:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,' fil :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    str(Pb0:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'Pb0 :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    str(Pb1:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'Pb1 :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    str(Pb2:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'Pb2 :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    str(Pa1:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'Pa1 :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    str(Pa2:10:5,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'Pa2 :'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;

readkey;

}
    if Fl_reglaj=1 then begin
        Calc_fact_el:= (Pb0+Pb1)*(Tsfi-TETA_Cup[1])+Pb2*(Tsfi-Man_Ti[1])-Savfact2*Pa1-Savfact3*Pa2;
        end
    else
        begin
            Calc_fact_el:= (Pb0+Pb1)*(Tsfi-TETA_Cup[n+13])+Pb2*(Tsfi-Man_Ti[n+13])-Savfact2*Pa1-Savfact3*Pa2;
            end;
end;

end;

function Calc_el_rac(N: integer):real;
var fil,Pb0,Pb1,Pb2,Pa1,Pa2:real;
begin
    fil:= (1+abucla+bbucla*z1+z1)/(1-z1);
    Pb0:= Kr*(1-fil)*(1+Ki+kd);
    Pb1:= - Kr*(1-fil)*(1+2*Kd);
    Pb2:= Kr*Kd*(1-fil);
    Pa1:= -(1+fil);
    Pa2:= fil;
    if Fl_reglaj=1 then
        Calc_el_rac:= (Pb0+Pb1)*(Tsfr-TETA_Cup[1])+Pb2*(Tsfr-Man_Ti[1])-Savfact2*Pa1-Savfact3*Pa2

```



```

else
    Calc_el_rac := (Pb0+Pb1)*(Tsfr-TETA_Cup[n+13])+Pb2*(Tsfr-Man_Ti[n+13])-Savfact2*Pa1-Savfact3*Pa2;
end;

{ procedura de identificare functie reglare }
procedure Ident_param;
var t: real;
    i: integer;
begin
    for i:=1 to 9 do
        begin
            Deltatab[i]:=Tablou[i+1]-Tablou[i];
            end;

        Box(1,1,GetMaxX-1,GetMaxY-40,cyan,SolidFill,Black);
        SetTextStyle(SmallFont,HorizDir,5);
        SetColor(white);
        XText := 2* TextWidth('X');
        YText := 2* TextHeight('X');
        dY := TextHeight('X') div 2;

        FOR I:=1 TO 9 DO BEGIN
            str(dELTATAB[I]:10:5,Sir);
            str(i:2,S);
            OutTextXY(XText,YText,'tablou delta '+S+' :'+Sir);
            YText := YText + 3 * dY;
            end;

            e1:=0;
            e2:=0;
            e3:=0;
            f1:=0;
            f2:=0;
            f3:=0;
            for i :=1 to 7 do
                begin
                    e1:=e1+Deltatab[i]*Deltatab[i];
                    e2:=e2+Deltatab[i]*Deltatab[i+1];
                    e3:=e3+Deltatab[i]*Deltatab[i+2];
                    f1:=f1+Deltatab[i+1]*Deltatab[i+1];
                    f3:=f3+Deltatab[i+1]*Deltatab[i+2];
                    end;
                f2:=e2;
                SS1:=(e1*f3-e3*f2)/(e2*f2-e1*f1);
                SS2:=(e3*f1-e2*f3)/(e2*f2-e1*f1);
                YText := YText + 3 * dY;
                YText := YText + 3 * dY;
                str(ss1:10:5,Sir);
                OutTextXY(XText,YText,'ss1 :'+Sir);
                YText := YText + 3 * dY;
                str(ss2:10:5,Sir);
                OutTextXY(XText,YText,'ss2 :'+Sir);

            readkey;
            UU1:=(-SS1+sqrt(SS1*SS1-4*SS2))/2;
            UU2:=(-SS1-sqrt(SS1*SS1-4*SS2))/2;

            YText := YText + 3 * dY;
            YText := YText + 3 * dY;
            str(uu1:10:5,Sir);
            OutTextXY(XText,YText,'uu1 :'+Sir);
            YText := YText + 3 * dY;
            str(uu2:10:5,Sir);
            OutTextXY(XText,YText,'uu2 :'+Sir);
            YText := YText + 3 * dY;
            str(Esantimp:6:0,Sir);
            OutTextXY(XText,YText,'esant :'+Sir);

            tel:=-10/(60*ln(UU1));
            te2:=-10/(60*ln(UU2));

            YText := YText + 3 * dY;
            YText := YText + 3 * dY;
            str(tel:10:5,Sir);
            OutTextXY(XText,YText,'tel :'+Sir);
            YText := YText + 3 * dY;
            str(te2:10:5,Sir);
            OutTextXY(XText,YText,'te2 :'+Sir);

            ke:=(Tsfi-Cuptor.Ta)/(2*2*Qel);
            ple:=1/tel;
            p2e:=1/te2;
            Psi := te2/(2*sqrt(tel+te2));
            OMEGA0 := 1/(sqrt(te2+tel));

            YText := YText + 3 * dY;
            YText := YText + 3 * dY;
            str(psi:10:5,Sir);
            OutTextXY(XText,YText,'psi :'+Sir);
            YText := YText + 3 * dY;
            str(omega0:10:5,Sir);
        }
    }

```

```

OutTextXY(XText,YText,'omega :'+Sir);

t:=esantimp/60;
ble:=ke*(1+exp(-p2e*t)*ple/(p2e-ple)-exp(-ple*t)*p2e/(p2e-ple));
b2e:=ke*(exp(-ple*t)*exp(-p2e*t)-exp(-p2e*t)*p2e/(p2e-ple)+exp(-ple*t)*ple/(p2e-ple));
ale:=-exp(-ple*t)-exp(-p2e*t);
a2e:=exp(-ple*t)*exp(-p2e*t);
ki:=-1/(1+a2e+ale)/(ale+2*a2e);
kd:=-a2e/(ale+2*a2e);
z1:=-b2e/ble;
mm:=-1/(ale+2*a2e);
if z1<-1 then
  z1:=-1
else if z1>0 then
  z1:=0;
Fif:=exp(-Psi*Omega0*t);
ro:=Psi*Omega0*t*sqrt(1-Psi*Psi)/Psi;
abucla:=2*ro*cos(Fif);
bbucla:=ro*ro;
kr:=(1+abucla+bbucla)/(mm*ble*(1-bbucla-2*z1-abucla*z1));

(
  YText := YText + 3 * dY;
  str(Kr:10:5,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'kr :'+Sir);
  YText := YText + 3 * dY;
  str(Ki:10:5,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'ki :'+Sir);
  YText := YText + 3 * dY;
  str(Kd:10:5,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'kd :'+Sir);
)
readkey;
end; (of calculate)

begin
  Initializ;
  if not Citesc_FV(FVCup) then begin
    RestoreCrtMode;
    Write('Fisierele de date(modelare) nu se pot deschide corect');
    halt(1);
  end;
  Calcinitial;
  Salv_init;
  Str(Niter:4:0,Sir);
  Val(Sir,Iiter,Err_conv);
  Trix := false;
  Contor:= 0;
  Ocolflag:=1;
  Factor:=100;
  repeat
    Gauss_SEIDEL(Nc,Nc3,Iiter,delta,FVCup,RAD_Cup,TETA_Cup,Epsil);
    Manev2:=(TETA_Cup[Nc+1]+TETA_Cup[Nc2+1]+TETA_Cup[1])/3;
    if Fl_reglaaj=1 then
      if (TETA_Cup[Nc3+1]>=Trmax) or (Manev2>=(Tsf+Abatmax)) then Factqell:=0
      else
        Factqell:=1
    else
      if (TETA_Cup[Nc3+1]>=Trmax) then Factqell:=0
      else
        Factqell:=1;
    Factor:=Factor-dTimp;
    if Factor<0 then begin
      Factqel:=0;
    end;
    if Cont_sute >= 100 then begin
      Cont_sute := Cont_sute-100;
      if Ocolflag=1 then begin
        Factor:=100;
        Savfact1:=Factor;
      end
    else begin
      Savfact3:=Savfact2;
      Savfact2:=Savfact1;
      Factor:=Calc_fact_el(Nc3,Nc);
      if Factor > 100 then Factor:=100;
      if Factor < 0 then Factor:=0;
      Savfact1:=Factor;
    end;
    if Factor > 0 then
      Factqel:=1
    else
      Factqel:=0;
    end;
    Calcule(Nc,Nc2,Nc3);
    if Cont_zeci >= Esantimp then begin
      Cont_zeci := Cont_zeci-Esantimp;
      if Ocolflag=1 then
        if (TETA_Cup[Nc3+13] > Man_Ti[Nc3+13]) then
          begin
            ScrTemp(Nc3,Nc,Contor);
            Contor:=Contor+1;
            if Contor>10 then begin
              Ocolflag:=0;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```

```

                Ident_param;
            end;
        end;
    end;
    if Cont_sec >= 60 then begin
        Cont_sec := Cont_sec-60;
        Cont_min := Cont_min + 1;
        Salv_Date;
    end;
    Cont_zeci:=Cont_zeci+dTimp;
    Cont_sute:=Cont_sute+dTimp;
    Cont_sec:=Cont_sec+dTimp;
    if Cont_min >= Tdu then Factu := 0;

    YText := YText + 3 * dY;
    str(Savfact1:3:0,Sir);
    OutTextXY(XText,YText,'Factor ,:'+Sir);
    YText := YText + 3 * dY;
    str(Cont_sec:3:0,Sir);
    str(Cont_sute:3:0,S);
    str(Cont_min:4:0,S1);
    OutTextXY(XText,YText,'Timp , '+S1+':'+Sir+':'+S);

    Manev1:=(TETA_Cup[Nc]+TETA_Cup[Nc2]+TETA_Cup[Nc3])/3;
    if (Tsf1-Manev1)<2*Abatmin then Trix:=true
until Trix=true;

readkey;

if Fl_mentin=1 then begin
    Savtmin := Cont_min;
    Savtsec := Cont_sec;
    Factqell:=1;
    repeat
        Gauss_SEIDEL(Nc,Nc3,Iiter,delta,FVCup,RAD_Cup,TETA_Cup,Epsil);
        Manev2:=(TETA_Cup[Nc+1]+TETA_Cup[Nc2+1]+TETA_Cup[1])/3;
        if Fl_reglaj=1 then
            if (TETA_Cup[Nc3+1]>=Trmax) or (Manev2>=(Tsf1+Abatmax)) then Factqell:=0
            else
                Factqell:=1
            else
                if (TETA_Cup[Nc3+1]>=Trmax) then Factqell:=0
                else
                    Factqell:=1;
        Factor:=Factor-dTimp;
        if Factor<0 then begin
            Factqel:=0;
        end;
        if Cont_sute >= 100 then begin
            Cont_sute := Cont_sute-100;
            if Ocolflag=1 then begin
                Factor:=100;
                Savfact1:=Factor;
            end
            else begin
                Savfact3:=Savfact2;
                Savfact2:=Savfact1;
                Factor:=Calc_fact_el(Nc3,Nc);
                if Factor > 100 then Factor:=100;
                if Factor < 0 then Factor:=0;
                Savfact1:=Factor;
            end;
            if Factor > 0 then
                Factqel:=1
            else
                Factqel:=0;
        end;
        Calcule(Nc,Nc2,Nc3);
        if Cont_zeci >= Esantimp then begin
            Cont_zeci := Cont_zeci-Esantimp;
        end;
        if Cont_sec >= 60 then begin
            Cont_sec := Cont_sec-60;
            Cont_min := Cont_min + 1;
            Salv_Date;
        end;
        Cont_zeci:=Cont_zeci+dTimp;
        Cont_sute:=Cont_sute+dTimp;
        Cont_sec:=Cont_sec+dTimp;

        YText := YText + 3 * dY;
        str(Savfact1:3:0,Sir);
        OutTextXY(XText,YText,'Factor ,:'+Sir);
        YText := YText + 3 * dY;
        str(Cont_sec:3:0,Sir);
        str(Cont_sute:3:0,S);
        str(Cont_min:4:0,S1);
        OutTextXY(XText,YText,'Timp , '+S1+':'+Sir+':'+S);
        Manev1:=(TETA_Cup[Ncve]+TETA_Cup[Nc2]+TETA_Cup[Nc3])/3;
        until ((Savtsec=Cont_sec)and(Savtmin+Tmen*60=Cont_min))or(Tmen=0);
    end;

```

ANEXA 11

```

readkey;

if Fl_racire=1 then begin
  Savtmin := Cont_min;
  Savtsec := Cont_sec;
  Factqel:=1;
  Trix := false;
repeat
  Gauss_SEIDEL(Nc,Nc3,Iiter,delta,FVCup,RAD_Cup,TETA_Cup,Epsil);
  Manev2:=(TETA_Cup[Nc+1]+TETA_Cup[Nc2+1]+TETA_Cup[1])/3;
  Factor:=Factor-dTimp;
  if Factor<=0 then begin
    Factqel:=0;
  end;
  if Cont_sute >= 100 then begin
    Cont_sute := Cont_sute-100;
    Savfact3:=Savfact2;
    Savfact2:=Savfact1;
    Factor:=Calc_el_rac(Nc3);
    if Factor > 100 then Factor:=100;
    if Factor < 0 then Factor:=0;
    Savfact1:=Factor;
    if Factor > 0 then
      Factqel:=1
    else
      Factqel:=0;
  end;
  Calcule(Nc,NC2,NC3);
  if Cont_sec >= 60 then begin
    Cont_sec := Cont_sec-60;
    Cont_min := Cont_min + 1;
    Salv_Date;
  end;
  Cont_zeci:=Cont_zeci+dTimp;
  Cont_sute:=Cont_sute+dTimp;
  Cont_sec:=Cont_sec+dTimp;

  YText := YText + 3 * dY;
  str(Savfact1:3:0,Sir);
  OutTextXY(XText,YText,'Factor ,:'+Sir);
  YText := YText + 3 * dY;
  str(Cont_sec:3:0,Sir);
  str(Cont_sute:3:0,S);
  str(Cont_min:4:0,S1);
  OutTextXY(XText,YText,'Timp , '+S1+':'+Sir+':'+S);

{readkey;
}
  Manev1:=(TETA_Cup[Nc]+TETA_Cup[Nc2]+TETA_Cup[Nc3])/3;
  if Manev1 <= Tsfr then Trix:= true;
until Trix=true;
end;

SetViewPort(0,0,GetMaxX,GetMaxY,ClipOn);
ClearViewPort;
end; {of calcule pentru modelul cu placi}

begin
end.

```