

TEZĂ DE DOCTORAT  
“PROPAGAREA ARDERII LA MATERIALELE COMBUSTIBILE SOLIDE ÎN  
INTERIORUL INCINTELOR”



**Conducător de Doctorat**

Prof. Dr. Ing. Nicolae ANTONESCU

**Doctorand**

Drd. Ing. Valentin CUBLEȘAN

București 2011

## CUPRINS

	Pag.
Cap. 1. Introducere, obiective	4
1.1. Introducere	4
1.2. Obiective	6
CAP. 2. Stadiul actual al cercetării pe plan intern și International	8
2.1. Școala Românească	8
2.2. Situația pe Plan Național	9
2.3. Situația pe Plan International	10
CAP. 3. Studiu documentar privind incendiul, procesele de ardere și propagarea fumului în clădiri	13
3.1. Particularități ale incendiului	14
3.2. Corelații privind procesele de ardere ale unor materiale combustibile solide	21
3.2.1. Fenomenul fizic al arderii	21
3.2.2. Arderea polimerilor sintetici	28
3.2.3. Arderea lemnului	31
3.2.4. Arderea materialelor textile	39
3.3. Propagarea fumului în clădiri	40
3.4. Modele fizico-matematice privind arderea materialelor combustibile solide, în incinte ventilate și neventilate	45
3.4.1. Modele matematice privind arderea în incinte ventilate și neventilate	46
3.4.2. Modele fizice privind arderea în incinte ventilate și neventilate	56
3.5. Rezultate experimentale din literatura, privind procesele de ardere din incinte ventilate și neventilate	59
3.5.1. Stand experimental pentru testarea la foc	60
3.5.2. Echiparea camerei și amplasarea punctelor de măsură pentru temperaturi	60
3.5.3. Rezultate experimentale privind arderea lemnului în camera ventilată și neventilată	61
3.5.4. Validarea experimentală a predicției teoretice a temperaturii gazelor de ardere	64

---

3.6. Analiza critica a documentarii	69
Cap. 4. Modelarea proceselor de transfer de căldură, prin radiație. Coeficienții Poleak	70
Cap. 5. Modelarea condițiilor de aprindere a elementelor de construcții supuse la incendiu.	82
5.1. Instalația Experimentală	82
5.2. Condiții de Etalonare	92
5.3. Proba de încercat	98
5.4. Parametrii măsurători	102
5.5. Metodologia de calcul	103
5.5.1. Fluxul de căldura acumulat de pereții incintei si a probei de testare	104
5.5.2. Fluxul de căldură transmis prin convecție de la proba către mediul exterior	105
5.5.3. Fluxul de căldură transmis prin radiație de către gazele de ardere probei de testa	105
5.5.4. Fluxul de căldura pierdut de gazele arse, pe cos	108
5.5.5. Fluxul de căldura transferat intre incinta si exterior	108
5.5.6. Temperatura de aprindere a plăcii din lemn	108
5.6. Rezultate experimentale	109
5.6.1. Aprecieri calitative	109
5.6.2. Aprecieri cantitative	113
Cap. 6. Validarea modelului teoretic privind procesele de transfer de căldura prin radiație	133
Cap. 7. Concluzii	135
Cap. 8. Contribuții personale. Acțiuni de viitor, propuneri	138
Cap. 9. Bibliografie	140
Anexe	

## Cap. 1. INTRODUCERE, OBIECTIVE.

### 1.1. Introducere

Incendiul este un fenomen cu implicații sociale deosebite. În fiecare an, pe plan mondial, incendiile provocă zeci de mii de pierderi de vieți omenești, sute de mii de răniți și uriașe pierderi materiale. În același timp incendiul determină mai multe pierderi de vieți omenești și bunuri materiale decât toate calamitățile naturale.

Datorită acestui fenomen, protecția și lupta contra incendiilor au căpătat o deosebită importanță în ultimii ani, în tot mai multe țări, atât la nivel guvernamental, cu precădere la Consiliul Europei, și mai ales la nivelul oamenilor de știință.

Până nu demult în România fenomenul de incendiu a fost considerat simplist, numai din punct de vedere al pompierilor, deci al consecințelor imediate.

Evoluția incendiului a fost studiată mai ales din punct de vedere practic, al necesităților de organizare a intervenției pentru stingere și al consecințelor.

Mai bine spus, se consideră că un incendiu convențional produs într-un spațiu închis evoluează în trei faze, după cum urmează:

- **faza de dezvoltare;**
- **faza de ardere activă;**
- **faza de regresie.**

Au fost realizate unele analize în scopul studierii variației suprafețelor cuprinse de incendiu și a cineticii geometrice a incendiilor. În schimb, în ceea ce privește propagarea incendiului se aprecia că principalii factori determinanți sunt viteza de ardere și alimentarea cu aer.

Institutele de cercetare-proiectare până la nivelul anilor 1990 nu au realizat cercetări asupra termodinamicii incendiului, elaborându-se doar studii de interes practic în urma testării unor elemente de construcții și a determinării rezistenței la foc a acestora. După anii '90 s-au introdus unele modele comerciale de incendiu, dar cu aplicații strict practice și locale, în deosebi pentru instalarea rețelelor de sprinklere.

În fiecare an, pe plan mondial, incendiile provoacă zeci de mii de pierderi de vieți omenești, sute de mii de răniți și uriașe pierderi materiale. La fiecare 7 minute, undeva în lume, izbucnește un incendiu, anual înregistrându-se peste 75000 de incendii. Acest flagel determina mai multe pierderi de vieți omenești și bunuri materiale decât toate calamitățile naturale.

Ca urmare, protecția și lupta împotriva incendiilor au căpătat o importanță deosebită. Pentru a putea evidenția cele mai eficiente metode de acțiune au fost analizate diferite criterii de comparație între serviciile de pompieri din diferite țări, precum și între datele comunicate îndeosebi la Centrul de Statistica Incendiilor, din cadrul CTIF (Comite Technique International de Prevention et d'Extinction du Feu) - Comitetul Tehnic Internațional pentru Prevenirea și Stingerea Incendiilor, organism care reunește ca membri 45 de țări din Europa, Aștia, America și Africa.

Acest comitet sintetizează datele primite în rapoarte care permit o imagine de ansamblu asupra activității serviciilor de pompieri din țările membre. În analiza comparativă a datelor se ține seama de diferențele existente între atribuțiile serviciilor de pompieri, între tipurile de solicitări și între metodele de înregistrare a datelor.

Numărul total de solicitări de intervenție nu poate fi considerat drept criteriu de comparație absolut, deoarece în unele țări în numărul total al intervențiilor sunt incluse și intervențiile medicale, intervențiile la accidente tehnice, la descarcerări, accidente în care au fost implicate materiale periculoase sau intervenții la solicitările cetățenești (de exemplu, animale blocate în copaci). În unele țări, numărul total al intervențiilor include și alarmele false. Astfel în numărul total al solicitărilor, intervențiile la incendii reprezintă doar 10 % în Austria și Franța, 7 % în Germania, 50% în Marea Britanie.

În ceea ce privește metodele de înregistrare a incendiilor, în Rusia incendiile de pășune, lizieră și deșeuri, pe suprafețe deschise, nu sunt considerate incendii, dar în Irlanda și SUA reprezintă 40% din totalul incendiilor.

În Germania, Polonia, Ungaria nu se înregistrează incendiile datorate coșurilor de fum, care au pondere importantă în numărul total al incendiilor în Danemarca sau Norvegia.

În urma diferitelor analize efectuate a fost apreciat ca cel mai corect criteriu de analiză statistică: numărul incendiilor de structură la 1000 de locuitori (incendiile de structură nu includ incendiile datorate coșurilor de fum).

Valorile medii ale numărului de incendii la 1000 de locuitori pentru 34 de țări membre CTIF pentru perioada 1993-1995 au fost incluse într-o statistică întocmită în 1997 de un colectiv CTIF condus de Prof.dr. N. N. Brushlinsky (Rusia) situația fiind următoarea:

1.	Elveția—14,0 incendii la mia de locuitori;	13.	Norvegia—2,6;
2.	Marea Britanie— 9,3;	14.	Polonia—2,6;
3.	Irlanda—8,9;	15.	Grecia—2,5;
4.	S.U.A. — 7,6;	16.	Olanda—2,5;
5.	Israel —5,1;	17.	Bulgaria—2,4;
6.	Franța— 4,8;	18.	Canada—2,4;
7.	Australia—4,4;	19.	Austria—2,3;
8.	Suedia—4,2;	20.	Lituania—2,3;
9.	Estonia—4,1;	21.	Ungaria—2,2;
10.	Danemarca—3,5;	22.	Cehia—2,0;
11.	Luxemburg—3,0;	23.	Rusia—1,8;
12.	Germania—2,6;	28.	Moldova—0,8;
		29.	România—0,39.

Ultimul loc ocupat de țara noastră este, rata incendiilor la 1000 de locuitori în România a fost la un nivel scăzut și în ultimii ani: 0,39 în anul 1997 și 0,70 în anul 2010, calculată la o populație de 21.680.951 de locuitori.

Media mondială nu este edificatoare, neexistând informații despre incendii din țări mari ca India (936 milioane de locuitori), Brazilia (161 milioane de locuitori), Pakistan, Nigeria, Mexic ș.a.

Pentru anul 2008 datele oficiale indicau rata incendiilor de 8,5 – Marea Britanie; 5,3 – Olanda; 2,8 – Germania; 1,9 – Austria; **0,70 – România.**

Analiza cauzelor deceselor înregistrate la un număr mare de incendii au evidențiat că la originea acestora ponderea cea mai importantă revine fumului și gazelor toxice de ardere, precum și, în proporție mai mică, arsurilor. Astfel, în cele ce urmează, în tabelul 1.1 sunt detaliate datele statistice publicate de Euralarm.

Tabel 1.1. Cauza deceselor la incendii.

Cauza deceselor la incendii	%
Fum și gaze de ardere	62,4
Arsuri	26,0
Răniri	10,2
Crize cardiace	0,6
Alte cauze	0,8

Gazele de ardere rezultate în urma procesului de ardere a materialelor și substanțelor combustibile, implicate în incendii, prezintă un real și major pericol pentru ocupanți, prin gradul de toxicitate mare (oxidul de carbon, oxizi ai azotului, acid cianhidric ș.a.).

Efectele negative ale agenților termici, chimici, electromagnetici ori biologici, care pot interveni în caz de incendiu, asupra construcțiilor, instalațiilor și utilizatorilor sunt numeroase, fiind prezentate în Anexa 2 din Normele generale de prevenire și stingere a incendiilor.

## 1.2. Obiective

Obiectivele generale ale lucrării constau în:

- realizarea unui model matematic pentru calculul fluxului de căldură transferat prin radiație de la gazele de ardere la o suprafață solidă (element de construcție), pentru calculul fluxului de căldură transmis prin radiație de la pereții adiacenți ai unei incinte către elementul de construcție. Pentru calculul fluxului de căldură transmis prin radiație de la pereții adiacenți către elementul de construcție utilizează metoda coeficienților Poleak;
- realizarea unui model fizic care să permită studiul proceselor de ardere a materialelor combustibile solide;
- validarea experimentală a fluxului de căldură transferat prin radiație elementului de construcție;

- validarea experimentală a temperaturilor în straturile elementului de construcție
- validarea experimentală a temperaturii elementului de construcție pe fața neexpusă la foc și implicit validarea experimentală a temperaturii de aprindere.

În plus față, de obiectivele menționate anterior prin prezenta lucrare se urmărește și dezvoltarea și implementarea unei baze experimentale, care să răspundă cerințelor impuse de reglementările în domeniul testării materialelor, produselor și echipamentelor pentru construcții, din punct de vedere al rezistenței la foc, și înscrierea lui în rândul Laboratoarelor de Încercări, acreditate și recunoscute în Comunitatea Europeană.

Data fiind noua abordare europeană, care impune modificarea concepției în vigoare privind proiectarea, verificarea și urmărirea în exploatare a construcțiilor, elementelor de construcții și a materialelor, în scopul asigurării siguranței cetățeanului, impun efectuarea de încercări de rezistență la foc a acestora, în vederea cunoașterii timpului și temperaturii de aprindere.

În același timp, lucrarea își propune realizarea de analize a incendiului din punct de vedere termodinamic, considerând incendiul ca un proces complex de ardere, cu evoluție nedeterminată, incluzând și alte fenomene de natură fizică, chimică, biologică (transfer de căldură, schimbul de gaze cu mediul înconjurător, formarea flăcărilor, transformări structurale produse în materialele și elementele de construcții), care acționează asupra construcțiilor, instanțiilor și utilizatorilor putând produce multiple efecte negative.

## CAP. 2. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII PE PLAN INTERN ȘI INTERNATIONAL.

### 2.1. Școala Românească.

În laboratorul de Termotehnică există laboratoare unice în domeniul cercetării și testării cazanelor, al proceselor de ardere și al testării rezistenței la foc (materiale și echipamente de instalații aferente construcțiilor). Se poate aprecia că laboratorul de Termotehnică asigură cele mai bune condiții pentru instruire, pentru elaborarea lucrărilor de licență, masterat și doctorat pentru tinerii care lucrează în domeniul proceselor de ardere.

Colectivul de “**Aparate Termice, Procese de Ardere și Gestiunea Deșeurilor**” abordează în cercetările sale trei aspecte majore ale politicii globale:

- economia de energie;
- protecția mediului;
- testarea rezistenței la foc a materialelor și echipamentelor de instalații aferente construcțiilor.

Colectivul de Aparate Termice al Catedrei de Termotehnică, reprezintă o școală de cercetare de prestigiu Național și Internațional, condusă cu autoritate de o perioadă lungă de timp de cunoscutul profesor dr. Ing. Nicolae ANTONESCU.

Un exemplu elocvent privind importanța cercetărilor actuale ale colectivului este direcția de cercetare: “valorificare energetică a biomasei”, justificată de potențialul de care dispune România, evaluate la circa 7.594 mii t/an ( $318 \times 10^9$  MJ/an), ceea ce reprezintă cca. 19% din consumul total de resurse primare la nivelul anului 2000.

În cadrul colectivului “Aparate Termice, Procese de Ardere și Gestiunea Deșeurilor” s-au cercetat în ultimii 15 ani **tehnicele de ardere a combustibilului lemnos**.

Sunt distincte două categorii mari de instalații de ardere a materialului lemnos:

- **arderea lemnului în bucăți mari;**
- **arderea lemnului tocat sau a peleților.**

În ambele direcții s-au efectuat cercetări care au avut ca rezultat parcurgerea tuturor etapelor, de la modele fizico-matematice de cunoaștere a proceselor până la optimizarea unor cazane și instalații de ardere produse în țara noastră.

Ca principale realizări științifice în aceste direcții de cercetare sunt:

- elaborarea unei teorii unitare a arderii masivului de lemn în strat;
- elaborarea unei teorii unitare a arderii particulei de lemn în suspensie;
- stabilirea pe un model cu vizualizare a particularităților specifice arderii cu gazeificare;
- elaborarea unui model pentru procesul de aprindere de suprafață a lemnului în arderea cu gazeificare;



- realizarea a **două teze de doctorat** privind arderea lemnului și a deșeurilor de lemn.

În același domeniu de cercetare se situează studiile privind ecologizarea depozitelor de deșeuri municipale. Ca direcție prioritară a fost studiul și realizarea **instalației de ardere pentru gazele emise de depozitele de deșeuri**, cu o primă aplicație pentru depozitul de deșeuri municipale din județul Timiș.

Principala dotare a direcției de cercetare "**Cazane și Instalații de Ardere**" este un laborator dotat cu două standuri de încercat cazane până la puteri de 400 kW și două standuri de încercat arzătoare independente de până la 300 kW. Laboratorul este acreditat RENAR, singurul laborator din țară care efectuează încercări recunoscute **CE** și care lucrează curent și pentru atestarea cazanelor din străinătate.

Este de menționat că laboratorul, rezultat în parte și din finanțarea unui grant. Este complet automatizat și rezultatele complete ale probelor se obțin pe un terminal computerizat.

## 2.2. Situația pe Plan Național.

În prezent în țară documentele de referință privind proiectarea construcțiilor din punct de vedere al siguranței și rezistenței la foc, bazate pe prescripții și nu pe "performanțe", s-au dovedit restrictive.

Recomandările prezentate în reglementările și ghidurile în vigoare nu pot furniza bazele pentru un calcul al siguranței la foc, bazat explicit pe principiile ingineriei.

Există foarte puține ghiduri tehnice care utilizează calculații bazate pe timp pentru a da relații foarte importante între timpul necesar pentru evacuare și timpul disponibil pentru evacuare, respectiv informații suplimentare asupra timpului în care oamenii pot ajunge departe de pericol, îndeosebi în magazine și clădiri cu aglomerări de persoane, inclusiv cei în incapacitate de a se deplasa.

Ghidurile normative sunt adesea sărace în detalii privind evacuarea, datorită informațiilor neadecvate despre comportarea oamenilor la incendiu.

Există mulți factori imprevizibili în domeniul incendiului cum ar fi:

- primul material care se va aprinde;
- poziția ușii rezistente la foc în momentul declanșării incendiului (închisă respectiv deschisă);
- activarea automată a sprinklerelor.

Luarea în considerare a acestor factori nu se poate realiza printr-o proiectare deterministă, ci printr-o abordare probabilistică care să se bazeze pe date statistice, cum ar fi: frecvența de apariție a incendiilor.

Pentru majoritatea clădirilor, de exemplu: case tip locuințe, fabrici, scoli, spitale birouri, magazine și alte clădiri cu public, se poate concepe un proiect determinist, deoarece proiectarea deterministă este mai ușoară, mai rapidă și mai puțin costisitoare decât proiectarea de tip probabilistă.

Aceasta din urmă este utilizată atunci când clădirea are o importanță strategică și consecințele unei erori în proiectare, construcție și funcționare în clădire sunt majore.

Reglementările naționale privind clasificarea materialelor de construcții în clasa de combustibilitate, precum și standardele de metodă, nu mai corespund cu noua concepție europeană de testare a materialelor la scara naturală sau la scara mică, urmărind reproducerea unor scenarii de incendiu bine determinate.

Criteriile de admisibilitate și de îndeplinire a cerinței esențiale “Siguranță la Foc”, prevăzute în normativele în vigoare, se bazează pe vechea clasificare, ceea ce va crea dificultate atât în circulația produselor, cât și în realizarea unor documentații tehnice de proiectare pentru diferite construcții solicitate de clienții europeni. Îndeplinirea cerințelor pentru libera circulație a produselor reprezintă una din condițiile esențiale ale apei-comunitar.

În țara noastră există un Centru de Testare și Analiză Structurală la Foc:

- Laboratorul Centrului de Studii și Experimentări Pentru Prevenirea și Stingerea Incendiilor, ce are în componență 30 ingineri și tehnicieni— încadrați în trei laboratoare:

- o - chimie și combustibilitate;
- o - instalații automate de avertizare, stingere și încercări hidraulice;
- o - instalații electrice și mijloace de protecție.

Acest laborator al Centrului de Studii este realizat în conformitate cu normele europene și este acreditat de către RENAR (Asociația de Acreditare din România).

### **2.3. Situația pe Plan Internațional**

În ultimi ani, au fost întreprinse cercetări ample în vederea fundamentării unei noi concepții privind proiectarea construcțiilor din punct de vedere al siguranței la foc, elaborarea unei noi metode de testare a materialelor și elementelor de construcții, în condiții mai apropiate de situațiile reale (la scară naturală) a unor noi standarde de clasificare, în euro-clase și a unor noi coduri și ghiduri tehnice de aplicare, pentru a asigura o siguranță sporită ocupanților. Abordările vechi ale siguranței la foc în clădiri se bazau pe câteva cerințe complexe, dar uneori necorelate pentru diferite componente ale sistemului de siguranță la foc. În acest sens Calotă, 2002 prezintă o Clasificare Europeană a Produselor Pentru Construcții din Punct de Vedere al Rezistenței la Foc.

Există o activitate intensă în întreaga lume pentru reformarea reglementarilor vizând incendiul, către o strategie a siguranței la foc bazată pe coduri de performanță la foc opuse codurilor normative. Aceasta activitate este impulsionată de nevoia de a avea metodologii mai flexibile de proiectare a clădirilor și mai puțin costisitoare, în special pentru clădirile mari, fără a scădea nivelul de siguranță.

Câteva organizații internaționale, cum ar fi:

- Asociația pentru Știința Siguranței la foc (IAFSS);
- Consiliul Internațional al Construcțiilor – Conseil International du Batiment (CIB), comitetele ISO s-au implicat adânc în dezvoltarea ingineriei siguranței la foc.

Unele țări au elaborat deja coduri de ingineria Siguranței la Foc bazate pe principii inginerești, cum ar fi: Australia, Marea Britanie, Japonia, Suedia, Noua Zeelandă).

Directiva 89/106/CEE din 21.12.1988 privind Produse Pentru Construcții, precum și numeroase decizii ale Comisiei Europene în aplicarea acestei directive și standardele amortizate elaborate de CEN, stabilesc cerințele esențiale pentru lucrări de construcții precum și pentru materiale și elemente de construcție ce urmează a fi finalizate în construcții.

De asemenea această directivă europeană mai are ca obiectiv principal armonizarea legislațiilor naționale cu referire la cerințele aplicabile produselor ignifuge, în construcții. Produsele nu pot intra pe piață decât dacă respectă cerințele esențiale, legate de: ***duritate și stabilitate, siguranță în caz de incendiu, igienă, protecția mediului, siguranța în exploatare, protecția împotriva zgometului, rezistență termică.***

Aceasta introduce noțiunea de „Specificație tehnică” pentru produsele din domeniul construcțiilor.

Acest lucru duce la definirea a 600 noi specificații europene și peste 1500 standarde suport, în care sunt incluse și metodele de testare la foc.

Importul acestor norme va fi considerabil, pentru că 80% din materiale și echipamentele ignifuge au stabilite performanțe la foc, performanțe ce vor fi reevaluate.

Metodele de testare ale EN sunt, în principiu, aceleași, ca și ale țării noastre, dar există și o serie de diferențe, cum ar fi: schimbarea temperaturii la configurația măsurătorilor, adică, flacăra utilizată este mai reală la testele EN, pentru că performanțele produselor ignifuge scad în timp, până la 5-10%, dar și până la 20%.

În Europa există o serie de organizații dedicate cercetării în domeniul protecției la foc, cum ar fi:

- IETTC (Institut of Building Sciences „E. Toroja” – Spania), cu preocupări în domeniu materialelor ignifuge de construcții și tehnicii de încercare și transfer tehnologic;

- INERIS ( Institut National de l’Enviromment Indistruel et des Risorques, France), care dezvoltă metodologii și studii de securitate la foc pentru activități subterane;

- SP (Swedich National Testing and Research Institute, Sweden), organizație nonprofit de cercetări și testări în cadrul focului, patronată direct de Guvernul suedez. Este organizația națională oficială pentru testare și evaluare tehnică a materialelor ignifuge, a produselor și a elementelor de construcție construcțiilor;

- TNO (Nederlands Organization for Applied Scientific Research, The Netherlands), centru de cercetări, care realizează expertize la foc pentru avizele de construcții civile. Este singura instituție din Olanda dedicată cercetării focului;

- UTT (UTT Building and Transport, Finland), cu preocupări în: proiectarea sistemelor de construcții, structura metalelor și a materialelor compozite, transport și logistică, structura drumurilor și a rocilor;

- SITU (Institute for Structural Analysis / Simulation in Turnebling, Austria). Institutul este unul din cele 63 semiautonome instituții ale Universității Tehnologice din Graz. Misiunea sa este

de a oferi educație în cercetare pentru domeniile analizei structurale a focului, metode numerice și biomecanică.

Aceste instituții realizează teste și elaborează norme de aplicare pentru țările lor, în vederea implementării „Directivelor Europene a produselor de construcții”.

Preocupările în acest domeniu este susținut și de numeroasele lucrări publicate în manifestările naționale și Internaționale, prezentate în cele ce urmează.

- V. CUBLESAN „Norme de incercare a echipamentelor pentru constructii, din punct de vedere al rezistentei la foc” – Timisoara 2009 – A 18-a Editie Instalatii Pentru Constructii si Confortul Ambiental.
- V. CUBLESAN „Testarea rezistentei la foc a echipamentelor de instalatii aferente cladirilor. Conditii de testare” – Timisoara 2009 – A 18-a Editie Instalatii Pentru Constructii si Confortul Ambiental.
- V. CUBLESAN “Concepții europene privind ingineria siguranței la incendiu”, Conferinta nationala cu participare internationala “Instalatii pentru Constructii si confortul ambiental”, editia a XIV, ISBN 973-625-223-X, (14÷15) aprilie 2005, Timisoara, pag. 79-84.
- Dr. ing. Sorin CALOTĂ, „Noua Clasificare Europeană a Produselor Pentru Construcții din Punct de vedere al Rezistenței la Foc” Conferința a IX-a “Eficiență, Confort, Conservarea Energiei și Protecția Mediului” – BIRAC 2002, București, 27-30 noiembrie.
- V. CUBLESAN „Cuptor de testare la foc” Conferința a VIII-a “Eficiență, Confort, Conservarea Energiei și Protecția Mediului” – BIRAC 2001, București, 27-30 noiembrie.
- V. CUBLESAN „Distribuția Temperaturilor în Camere cu Ventilare Forțată” Conferința a VIII-a “Eficiență, Confort, Conservarea Energiei și Protecția Mediului” – BIRAC 2001, București, 27-30 noiembrie.
- prep. drd. ing. Valentin Cublesan, s.l. dr. ing. Anica Ilie *Stand experimental pentru testarea rezistentei la foc a materialelor de constructii.* Conferinta Instalatii pentru Constructii si Confortul Ambiental – Timisoara, 22 – 23 aprilie, 2004, ISBN 973-625-140-3 (pag.482 – 488)
- Drd. ing. Valentin CUBLEȘAN, dr. ing. Rodica DUMITRESCU „Evoluția temperaturilor în camere cu ventilare forțată”, A XIV-a Conferință cu participare internațională Instalații Pentru Construcții și Confortul Ambiental, 13-14 Aprilie 2005 – Timișoara.
- Drd.ing.Valentin CUBLEȘAN, Dr.ing.Sorin CALOTĂ “Norme de încercare a produselor pentru construcții din punct de vedere al reacției la foc”, A XIV-a Conferință cu participare internațională Instalații Pentru Construcții și Confortul Ambiental, 13-14 Aprilie 2005 – Timișoara.
- Drd. ing. Valentin CUBLEȘAN, Dr. ing. Anica ILIE “Concepții europene privind ingineria siguranței la incendiu”, Conferinta nationala cu participare internationala “Instalatii pentru Constructii si confortul ambiental”, editia a XIV, ISBN 973-625-223-X, (14÷15) aprilie 2005, Timisoara, pag. 79-84.
- Drd. ing. Valentin CUBLEȘAN, prof. dr. ing. Florea CHIRIAC „Sistem de testarea rezistentei la foc a materialelor si echipamentelor pentru constructii si instalatii”, A X – a Conferință de Eficiență, Confort, Conservarea Energiei și Protecția Mediului, București, 28-29 nov. 2006 CD

## **CAP. 3. STUDIU DOCUMENTAR PRIVIND INCENDIUL, PROCESELE DE ARDERE ȘI PROPAGAREA FUMULUI ÎN CLĂDIRI.**

### **Obiectivele capitolului 3:**

În prezentul capitol doctorandul parcurge un volum mare de material de specialitate, material care se referă la fazele proceselor de ardere ale unor materiale combustibile solide, la relațiile care descriu aceste faze, precum și relațiile criteriale pentru modelele fizice dezvoltate de unii specialiști. Doctorandul a structurat materialul analizat după cum urmează:

- Elaborează schemele logice pentru procesul de ardere și procesul de dezvoltare a incendiului.
- Identifică relația care descrie estimarea temperaturii gazelor de ardere deasupra focarului, dintr-o incintă.
- Identifică relația cu ajutorul căreia este estimată durata de timp necesară umplerii cu fum a încăperii.
- Identifică relațiile pentru calculul vitezei de ardere a materialelor combustibile solide, precum și relația ce descrie fluxul de căldură ce ajunge efectiv de la gazele de ardere la suprafața.
- Identifică fazele arderii.
- Identifică mecanismul propagării fumului într-o incintă și relațiile experimentale, care descriu estimarea temperaturii gazelor de ardere deasupra focarului și estimarea duratei de timp necesare umplerii cu fum a volumului încăperii incendiate.
- Identifică parametrii termodinamici care descriu mediul gazos, precum și relațiile de calcul ale acestora.
- Stabilește un sistem de ecuații care descrie modul general de propagare a arderii în faza de dezvoltare a unui incendiu. Sistemul de ecuații servește la determinarea debitului de gaze din incintă.
- Descrie o ecuație simplificată pentru bilanțul energetic pentru o flacără ascendentă. Ecuația de bilanț include pe deoparte fluxul de căldură pierdut prin transport de masă prin deschideri și fluxul de căldură transmis prin radiație, prin suprafețele interioare ale incintei, iar pe de altă parte fluxul de căldură degajat prin arderea combustibilului.
- Definește mărimile adimensionale pentru parametrii care intervin în sistemul de ecuații care descrie modul general de propagare a arderii în faza de dezvoltare a unui incendiu. Aceste mărimi adimensionale servesc la scrierea ecuației de determinare a debitului masic de gaze evacuat din incintă, sub formă de ecuație diferențială.
- Identifică relațiile criteriale care descriu fenomenul de ardere în timpul incendiului (Froude, Reynolds, Grashof).
- Identifică și prezintă un model experimental simplu, pentru studiul temperaturii gazelor de ardere rezultate în urma arderii lemnului, la diferite valori ale schimburilor orare de aer.
- Analizează rezultatele obținute experimental vs. teoretic privind temperatura gazelor de ardere, respectiv creșterea de temperatură pe verticală într-o incintă ventilată și neventilată.

### 3.1. Particularități ale incendiului.

**INCENDIUL** este un proces complex de ardere, cu evoluție nedeterminată, incluzând și alte fenomene de natură fizică și chimică (transfer de căldură, formarea flăcărilor, schimbul de gaze cu mediul înconjurător, transformări structurale produse în materialele de construcție și elementele de rezistență, etc.).

Agenții termici, chimici, electromagnetici sau biologici, rezultați în urma incendiului, acționează asupra construcțiilor, instalațiilor și utilizatorilor, putând produce multiple efecte negative cum ar fi: deformații, reducerea rezistenței, instabilitate, prăbușire, respectiv arsuri, intoxicații, traumatisme, panică ș.a..

Pentru definirea noțiunii de incendiu sunt necesare următoarele elemente care interacționează între ele:

- existența substanțelor și/sau materialelor combustibile și acțiunea unei surse de aprindere;
- inițierea și dezvoltarea necontrolată în spațiu și în timp a procesului de ardere;
- necesitatea unei intervenții organizate în scopul întreruperii și lichidării procesului de ardere;
- producerea de pierderi în urma arderii de vieți, de materiale sau de altă natură.

Prin urmare, nu orice ardere constituie un incendiu. De exemplu, nu sunt catalogate incendii:

- arderea produselor în cuptoare sau alte instalații similare;
- unele aprinderi rezultate în urma funcționării instalațiilor electrice;
- arderea sub control a gunoaielor, ierburilor;
- fumigații care nu necesită intervenții de stingere.

Datorită evoluției aleatoare nu pot exista două incendii la fel, a căror evoluție să fie paralelă.

În dezvoltarea unui incendiu intervin numeroși factori: formă și dimensiunile încăperii, sarcina termică, deschiderile spre exterior, natura și poziționarea materialelor combustibile, locul și modul de inițiere a incendiilor, dispunerea încăperii în clădire.

Urmărind similitudinea acestor numeroși factori, experimentările de incendiu la scară naturală dau rezultate foarte variate, uneori chiar contradictorii.

Se consideră că în evoluția unui incendiu, în interiorul unei încăperi intervin cinci faze, după cum urmează:

#### **Faza de inițiere a incendiului**

Este faza în care, datorită unor împrejurări favorabile sunt puse în contact materialul combustibil cu sursa de aprindere, a cărei energie, acumulată în timpul perioadei de contact, duce la inițierea incendiului.

### **Faza de ardere lentă**

Are o durată extrem de variată. Aceasta fază este absentă în numeroase cazuri, ea poate dura câteva minute, ore și în unele situații, chiar zile și săptămâni (în cazul arderii cu deficit de aer). Aria de combustie este limitată la zona focarului (incendiu local).

În această fază temperatura crește relativ lent, fără a atinge valori importante. Arderea se propagă la materialele din vecinătatea sursei de inițiere, care sunt termo-degradate profund, dar nu distruse complet.

Din descompunerea materialelor se degajă gaze care se acumulează în atmosfera ambiantă și formează cu aerul un amestec combustibil, precum și gudroane, care contribuie la propagarea incendiului.

### **Faza de dezvoltare lentă a incendiului**

În această fază, arderea se propagă la toate obiectele învecinate cu focarul, având aerul necesar încă în cantitate suficientă.

Datorită diferenței de densitate, gazele calde mai ușoare se acumulează sub tavan și ies din incintă pe la partea superioară a deschiderilor, fiind înlocuite de un curent de aer rece care pătrunde prin partea inferioară. Există un anumit nivel în deschideri - planul neutru - deasupra căruia gazele calde ies în permanență.

Radiația devine principalul factor al transferului de căldură, în principal prin stratul de gaze fierbinți și fum acumulat sub tavan, propagând incendiul și în zone mai îndepărtate de focar, prin încălzirea materialelor din aceste zone la temperatura de aprindere. Natura și finisajul pereților joacă un rol esențial datorită aportului suplimentar, însemnat, de radiație termică (radiație reciprocă între pereți).

Temperaturile în diferite puncte ale incintei diferă mult unele față de altele în același moment, suferind importante și rapide fluctuații. Faza de ardere poate evolua în mai multe direcții, după cum urmează:

- dacă aerul necesar arderii este în cantitate suficientă, apare fenomenul de **flash-over**, (termen anglosaxon intraductibil, preluat ca atare în literatura de specialitate europeană, inclusiv în standardul de terminologie SR-EN ISO 13943).

Flash-over este un fenomen care are loc instantaneu, în care se instalează brusc arderea generalizată a tuturor suprafețelor combustibile din incintă. Ca urmare, scade brusc cantitatea de oxigen din aer, iar procentul de oxid de carbon atinge valoarea maximă fiind momentul cel mai periculos al intervenției pentru pompieri.

Fenomenul de flash-over este caracterizat și prin creșterea rapidă, exponențială a temperaturii și printr-o masivă și rapidă generare de fum, mai ales când finisajul pereților este combustibil.

- dacă incinta este închisă, cantitatea de aer necesar arderii devine în timp insuficientă. Rezultă o încetinire, apoi o regresie în dezvoltarea focului, care poate să se stingă spontan. Acest fenomen este posibil și în cazul unei depărtări relativ mari între masele combustibile, transferul de căldură prin conducție nemaifiind posibil.

- dacă în situația de regresie a incendiului, are loc o admisie bruscă de aer, cauzată de spargerea geamului, deschiderea ușii, spărturi sub planul neutru, se produce fenomenul de **backdraft** (termen intraductibil) care are manifestări similare celui de flash-over.

#### **Faza de incendiu generalizat**

După producerea fenomenului de flash-over (sau, mult mai rar, backdraft) arderea se generalizează în întreaga incintă. Temperaturile se uniformizează spre valori maxime, transferul de căldură prin radiație devenind net preponderent. În cursul acestei faze, structurile de rezistență sunt cele mai afectate de incendiu: se fisurează și se dislocă pereții, se lărgesc deschiderile ș.a., având ca urmare propagarea incendiului în incintele alăturate și apoi în întreaga clădire.

Regimul de ardere se stabilizează și este condiționat fie de:

- suprafața materialelor combustibile, caz în care viteza de ardere este limitată de mărimea suprafeței combustibile, când aerul circulă în exces, în raport cu suprafața de contact dintre combustibil și aer (*incendii ventilate* - care sunt intense și de mică durată);
- dimensiunile deschiderilor (debite de aer circulate), caz în care cantitatea de aer din incintă este mai mică decât valoarea critică necesară combustiei (*incendii neventilate*) viteza de ardere depinde de dimensiunile deschiderilor (ferestrelor) din incintă. De exemplu, nu numai suprafața ferestrei influențează regimul arderii, dar și forma ei. Astfel, o fereastră înaltă asigură un aflux mai mare de aer în comparație cu una joasă cu aceeași suprafață.

#### **Faza de regresie**

În cursul acestei faze, temperatura încetează să mai crească, apoi începe să scadă, datorită epuizării combustibilului, dar scăderea nu este bruscă, acționând în continuare distructiv asupra structurilor.

Pentru fiecare fază pot fi identificați parametri ce caracterizează fenomene specifice care delimitează clar aceste faze.

Schema logică de dezvoltare a unui incendiu și curba teoretică a temperaturii / timp pentru un incendiu dintr-o incintă sunt prezentate în figurile 3.1 și 3.2.



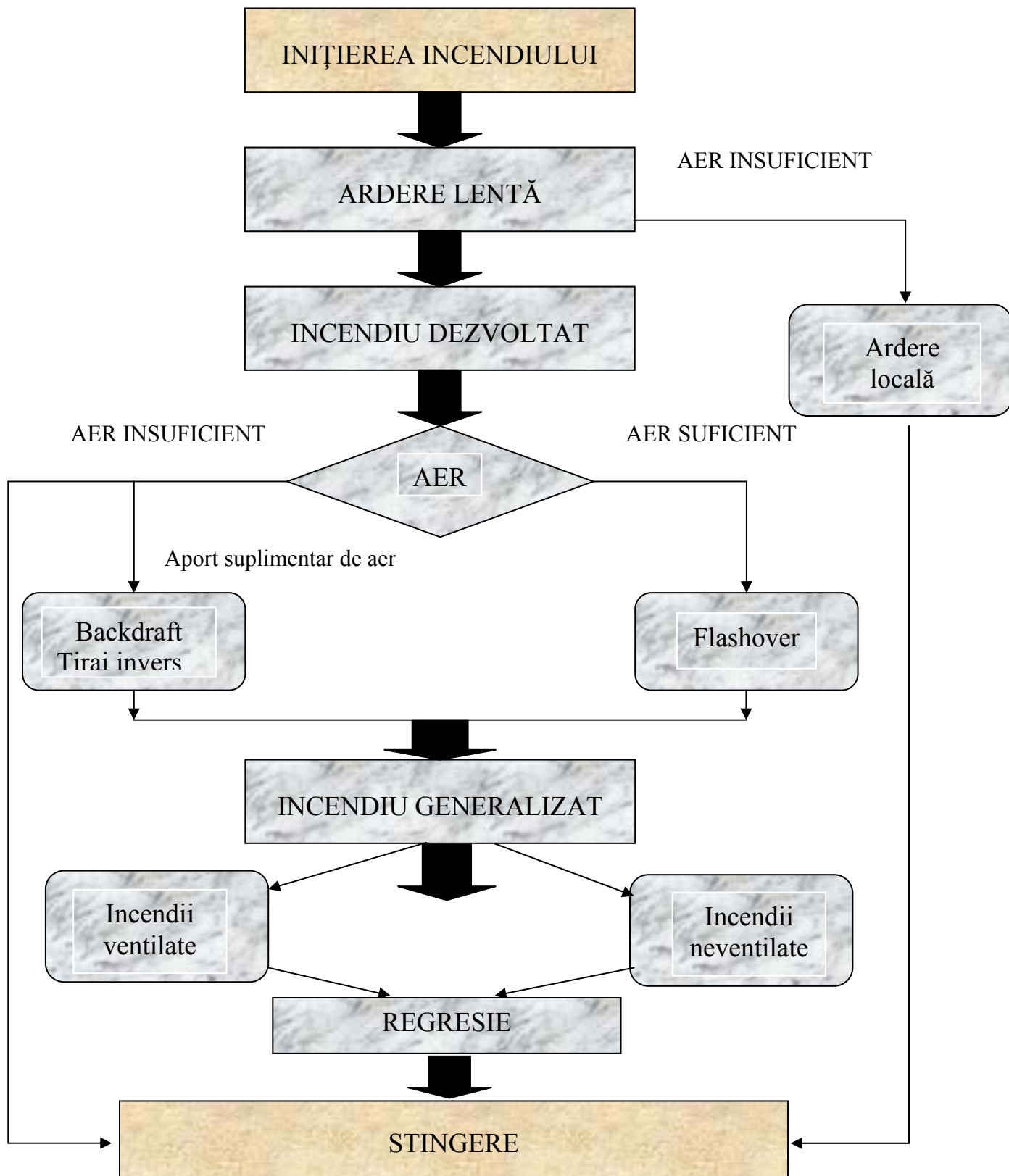


Figura 3.1. Schema logica pentru un incendiu.

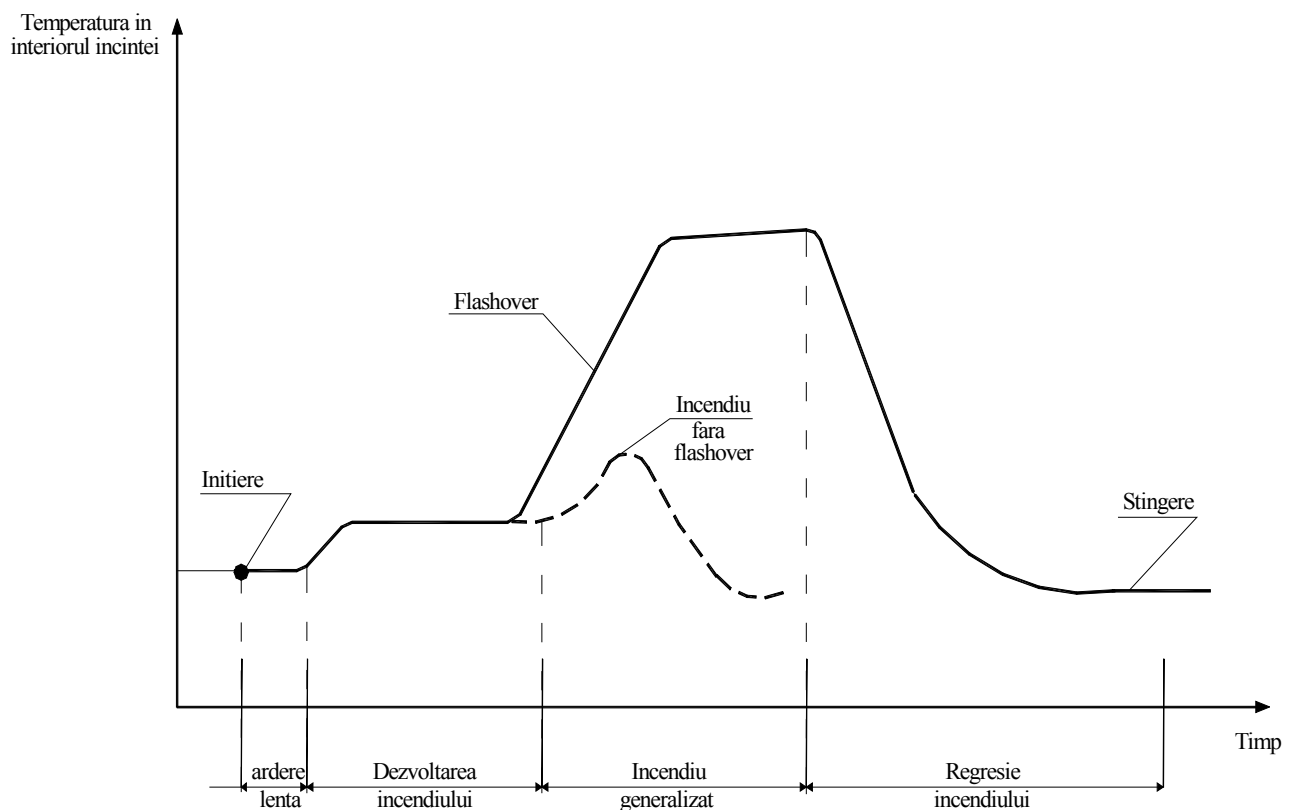


Figura 3.2. Curba teoretică temperatură - timp pentru un incendiu într-o încălț.

O identificare corectă a surselor de aprindere și implicit a stabilirii cauzelor de incendiu permite realizarea de statistici reale cu consecințe importante la nivel macro și microsocial. Astfel, o evidențiere corectă a celor mai frecvente cauze de incendiu, dinamica acestora, repartizarea pe ramuri de activitate (comerț, industrii ș.a.), influența factorilor sezonieri geografici sau de timp (zi de odihnă sau muncă, ora din zi), pagubele pricinuite ș.a., asigură:

- compararea incendiilor cu alte evenimente negative (catastrofe, cutremure, accidente industriale) din punct de vedere al planificării resurselor alocate pentru prevenirea acestora și a găsirii modalităților pentru cel mai eficient impact al utilizării acestora, pe plan național sau local;
- perfecționarea permanentă a legislației p.s.i., elaborarea unor norme și regulamente eficiente și echilibrate prin măsuri specifice, inclusiv la nivelul fiecărui agent economic;
- dezvoltarea unor programe educaționale adecvate, mai ales pentru situații social-economice momentane cu implicații negative (de exemplu: iarna – crește numărul incendiilor de sobe; lipsa în unele perioade a buteliilor de pe piață favorizează incendiile datorate improvizățiilor), inclusiv prevenirea unor acte antisociale de tip arson;
- identificarea produselor și echipamentelor p.s.i. (detectoare, stingătoare, instalații stingere, centrale de semnalizare, ș.a.) cu funcționare necorespunzătoare;

- elaborarea unor măsuri speciale pentru imobile sau incinte cu aglomerări de persoane sau bunuri de mare valoare;
- identificarea obiectivelor pentru perfecționarea concepției și tacticii (prevenire, intervenție, antrenament ș.a.) pompierilor;
- fundamentarea studiilor de risc de incendiu.

Pe plan mondial nu există încă un punct de vedere unitar asupra clasificării cauzelor de incendii.

Astfel:

- L. Amy, (indice bibliografic 23), propune următoarea clasificare a acestora: *incendii de natură electrică, flacără deschisă, efect termic, aprindere spontană, incendii datorate exploziilor, incendii de natură mecanică.*
- Borowski și Pawlowski propun 19 categorii (*din imprudența persoanelor de peste 15 ani cu: țigări, cu receptoare de energie electrică, cu iluminatul electric, cu lichide inflamabile, în timpul lucrărilor de sudură, din imprudența persoanelor sub 15 ani, instalații electrice, instalații mecanice, instalații termice, scânteii – din coșuri, locomotive, alte vehicule – descărcări atmosferice, autoaprinderi, incendieri ș.a.*).
- Bălulescu propune: *foc deschis, corpuri supraîncălzite, scânteii sudură, scânteii și arce electrice, scurtcircuit, trăsnet, scânteii mecanice, explozii, autoaprindere, reacții chimice.*
- O'Connor propune 4 categorii: *incendii providențiale*-acțiuni ale lui Dumnezeu (trăsnetul); *incendii accidentale*-neintenționate și explicabile tehnic-și anume: defecte ale instalațiilor electrice, a celor de gaze, flacăra deschisă și scânteii, defecte ale aparatelor de încălzire casnice, centrale termice (de bloc), defecte la aparatele de bucătărie, copii și animale de casă, depozitare incorectă a materialelor (adică aprindere spontană) fumat, laboratoare clandestine (cu referiri la cele care produc droguri: LSD, PCP, DMI, heroină ș.a. și care folosesc produse inflamabile: acetonă, benzen, cloroform ș.a.), operații în construcții (sudură, tăiere ș.a.), radiația solară; *incendii nedeterminate*-cauze necunoscute sau imposibil de determinat; *incendii intenționate tip arson.*

Există diferențe de la țară la țară și în clasificările codificate, în fișele de incendiu, utilizate pentru completarea statisticilor curente. În normele americane NFPA-901 – Uniform Coding for Fire Protection – ed. 1993 (indice bibliografic 24) se prevăd trei secțiuni pentru caracteristicile aprinderii: „forma căldurii de aprindere“, „primul material care a ars“, „factorul de aprindere“. La secțiunea „forma căldurii de aprindere“ (sursa) sunt specificate 10 categorii; focuri deschise exterioare, aparate cu combustibil lichid sau gaz, aparate cu combustibil solid, arc electric și scurtcircuit, obiecte supraîncălzite, explozivi-materiale incendiare, căldură de la materiale generatoare de fum (țigări ș.a.), surse naturale, căldură propagată, alte forme (forme multiple de inițiere).

Pompierii români utilizează pentru completarea rapoartelor de intervenție și analiză statistică 14 tipuri de surse de aprindere: arc sau scânteie electrică; efectul termic al curentului electric; scurtcircuit electric; electricitate statică; flacără deschisă; flacără închisă; efect termic

(căldură prin contact sau radiație); frecare; scânteii mecanice; jar sau scânteii (inclusiv țigara); autoaprindere; reacție chimică; explozie, substanțe incendiare; trăsnet; alte surse (radiație solară, energie nucleară, căderea unor corpuri din atmosferă, etc.).

Inițierea unui incendiu este un fenomen complex care este influențat de următorii factori:

▪ *sursa de aprindere* și, implicit, *mijlocul* care o produce, sursă care să posede energia minimă necesară pentru aprinderea combustibilului; sursa de aprindere este flacăra, scânteie sau obiect incandescent a căror natură diferă;

▪ *existența materialului combustibil* (gazos, lichid, solid) în cantitate suficientă pentru susținerea arderii;

▪ *existența unor împrejurări determinate* și altor condiții favorizante care să pună în contact sursa de aprindere cu masa combustibilă.

Clasificarea incendiilor, propusă de colonelul S. Calotă încă din 1992, (indice bibliografic 21) și recunoscută în ultimii ani prin preluare în diferite reglementări, se poate face în raport cu cauzele care le-au produs în funcție de factorii menționați mai sus și de natura surselor de aprindere. Astfel, după Calotă 1992, rezultă următoarele categorii de incendii în funcție de sursa de aprindere:

1. Surse de aprindere *cu flăcără*:

- focuri în aer liber;
- flăcără (chibrit, lumânare);
- flăcări de la aparate termice;

2. Surse de aprindere *de natură termică*:

- obiecte incandescente (țigară, topituri metalice, becuri și proiectoare electrice, jar, cenușă, zgură de la aparate de încălzit, particule incandescente de la sudură);
- căldură degajată de aparate termice (casnice, industriale);
- efectul termic al curentului electric;
- coșuri defecte și necurățate (fisuri, scânteii ș.a.);

3. Surse de aprindere *de natură electrică*:

- arcuri și scânteii electrice;
- scurtcircuit (echipamente, cabluri ș.a.);
- electricitate statică;

4. Surse *de aprindere spontană (autoaprindere)*:

- aprindere spontană de natură chimică (inclusiv reacții chimice exoterme);
- aprindere spontană de natură fizico-chimică;
- aprindere spontană de natură biologică;

5. Surse de aprindere *de natură mecanică*:

- scânteii mecanice;
- frecare;

6. Surse de aprindere *naturale*:

- căldură solară;
- trăsnet;

7. Surse de aprindere datorate *explozivilor și materialelor incendiare*;

8. Surse de aprindere *indirecte* (radiația unui focar de incendiu, flacăra unui amestec exploziv ș.a.).

Trebuie remarcat faptul că anumite circumstanțe (înlăturarea urmelor pentru reluarea rapidă a activității, număr redus de indicii datorat distrugerilor masive, producere în zone izolate, fără personal calificat ș.a.) nu permit identificarea cu certitudine și univoc a fiecărei din cele patru componente ale cauzei incendiului (sursă, mijloc, primul material aprins, împrejurare) și ca urmare concluzia formulată poate avea două sau mai multe variante probabile. Pe cale de consecință sunt și situații când cauza incendiului rămâne nedeterminată (în curs de stabilire) o perioadă mai mare sau mai mică de timp. De aceea în orice statistică națională un procent variabil (5÷30%) revine incendiilor cu cauză nedeterminată.

## **3.2. Corelații privind procese de ardere ale unor materiale combustibile solide**

### **3.2.1. Fenomenul fizic al arderii**

Arderea este o reacție chimică exotermică rapidă, în faza de gaz, desfășurată prin lanțuri de radicali, ioni ș.a. în stare neutră sau de excitație electronică.

Studii complexe au fost efectuate privind arderea în instalații tehnice - industriale, artisanale sau de laborator, pentru obținerea performanțelor optime cu un anumit combustibil, cu un anumit arzător sau cu o anumită instalație sau mașină termică. În aceste cazuri se cunosc caracteristicile fizico-chimice ale combustibililor, geometria camerelor de ardere, gazo-aerodinamica fluxurilor de combustibil ș.a., ceea ce a permis elaborarea unor metode de calcul și proiectare eficiente și obținerea unor date științifice precise care au contribuit la adâncirea cunoștințelor în domeniu.

Fenomenele de ardere întâlnite în timpul incendiilor prezintă unele diferențe față de arderile controlate din sistemele tehnice uzuale. Studii, mai puțin sistematice și complexe (datorită dificultății de abordare și importanței economice mai reduse) au fost întreprinse în domeniul arderii accidentale a materialelor diverse, fenomen inclus în noțiunea de incendiu.

Inițierea și dezvoltarea incendiului sunt fenomene aleatorii, constând într-o însumare de procese fizice și chimice, care se amplifică și devin complexe pe măsură ce se înaintează în timp, astfel încât nu este posibilă descrierea lor printr-o simplă schemă funcțională. Aceasta este cauzată de cantitatea și sortimentul extrem de variat al substanțelor și materialelor implicate în incendiu, starea lor de agregare, natura și complexitatea proceselor tehnologice și de o multitudine de factori interni și externi cu evoluție aleatorie, ca de exemplu: temperatura și umiditatea mediului ambiant, viteza și direcțiile de deplasare a curenților de aer interiori, suprafața materialelor combustibile, suprafața și modul de dispunere a gurilor din pereți și

plafoane, înălțimea și configurația geometrică a încăperilor și a clădirii în ansamblu, direcțiile dominante de acțiune ale curenților de aer exteriori.

Procesul de ardere este posibil numai dacă se întrunesc simultan, în timp și spațiu, următoarele condiții :

- *existența materialului combustibil ;*
- *prezența substanțelor care întrețin arderea (oxigenul din aer sau substanțe care pot ceda oxigen) ;*
- *sursă de aprindere cu energie capabilă să realizeze condițiile de aprindere.*

Importanța cunoașterii limitelor de aprindere ale combustibilului este foarte mare, deoarece un proces de ardere se poate întrerupe dacă apare o fluctuație de dozaj, care să depășească aceste limite. Limitele de aprindere pentru câțiva combustibili, în amestec cu aerul, la temperatura ambiantă, sunt prezentate în tabelul 3.1.(indice bibliografic 10: N. ANTONESCU, P.D. STĂNESCU, N.n. ANTONESCU, Procese de ardere. Bazele fizice si experimentale, 2002-MatrixRom).

Tabel 3.1. Dozaje la limite de aprindere.

<b>Combustibil</b>	<b>Limita inferioara de aprindere</b>	<b>Limita superioara de aprindere</b>
<b>H<sub>2</sub></b>	4,10	74,20
<b>CO</b>	12,50	74,50
<b>CH<sub>4</sub></b>	5,30	14,90
<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	3,10	12,50
<b>C<sub>3</sub>H<sub>8</sub></b>	2,40	9,50
<b>C<sub>4</sub>H<sub>10</sub></b>	1,80	8,40
<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b>	2,50	80

Din tabelul 3.1 se observă că pentru hidrocarburi, limitele de aprindere sunt foarte apropiate, și în acest caz există pericolul de stingere la dozaje de combustibil in amestec, incorecte.

În arderea tehnică (din instalațiile de ardere industriale) acești factori sunt bine determinați. În cazul incendiilor, apariția lor (calitativ și cantitativ) este aleatorie.

Ca primă etapă în descifrarea proceselor de apariție și dezvoltare a incendiilor, studierea aprofundată a fenomenelor de ardere necesită abordări diferite față de cele clasice. Se are în vedere că, de regulă, nu se poate asigura repetabilitatea experimentărilor care să conducă la relații precise. De asemenea, numărul mare de factori aleatori a impus deseori unele ipoteze simplificatoare. Cu toate aceste dificultăți majore și în cazul studiului arderii întâlnite la incendii pot fi evidențiate unele legități ce pot fi cuantificate în ecuații, cu verificare în practica curență.

**Arderea**, ca fenomen tehnic asociat unui incendiu, este definită, conform standardului SR-ISO 8421 / 1 -1998, drept reacția exotermă a unei substanțe combustibile cu un comburant, însoțită în general de emisie de flăcări și / sau incandescență și / sau emisie de fum.

În studiul teoretic al incendiilor, se consideră următoarele *principii ale arderii* :

- Pentru a avea loc un proces de ardere este necesară prezența unui material combustibil, a comburantului ( sau agent de oxidare ) și a sursei de aprindere;
- Materialul combustibil trebuie să fie încălzit până la temperatura de aprindere spontană ( sau aprindere ) pentru ca să ardă sau să susțină propagarea flăcării;
- Arderea ulterioară a combustibilului este determinată de căldura disipată de flăcări către procesul de piroliză sau vaporizarea combustibilului;
- Arderea va continua până când:
  - a) materialul combustibil este consumat;
  - b) concentrația comburantului devine mai mică decât minimumul necesar pentru a susține arderea;
  - c) pierderile de căldură sunt atât de mari încât nu se mai asigură căldura necesară pentru piroliza în continuare a materialului combustibil;
  - d) flăcările sunt inhibate chimic sau suficient răcite pentru a împiedica desfășurarea reacțiilor în continuare.

Nu orice ardere se transformă în incendiu. ***Incendiul este definit ca o ardere care se dezvoltă necontrolat în spațiu și / sau timp.***

În timpul unui incendiu are loc arderea unor materiale diverse, de regulă solide. Arderea are loc aproape întotdeauna în fază gazoasă: amestec aer-gaz combustibil, excepție făcând arderea difuzivă în mediu cu deficit de aer. Schema generală a procesului de ardere este prezentată în figura 3.3.

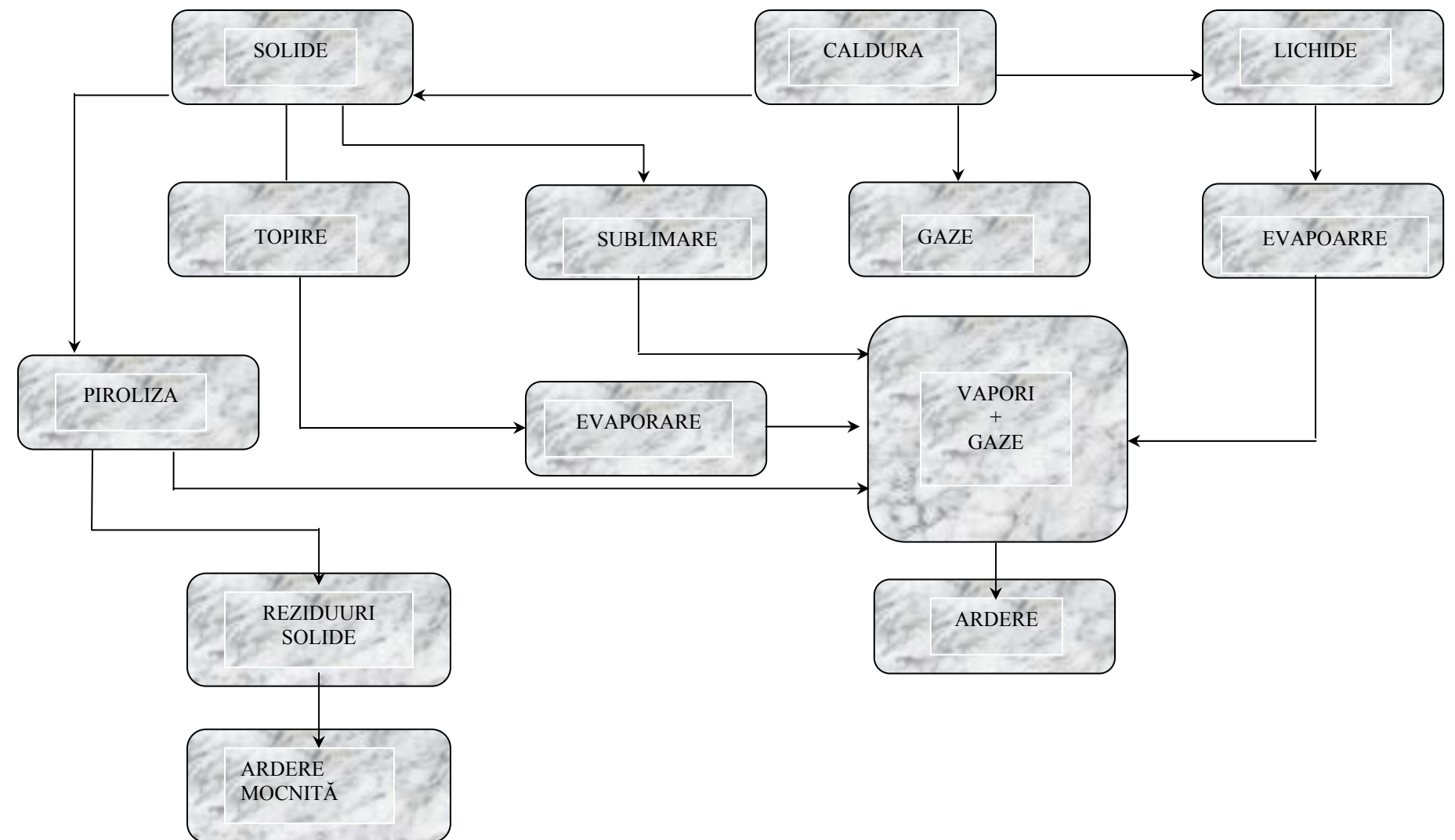


Figura 3.3. Schema generală a procesului de ardere în cazul unui incendiu.



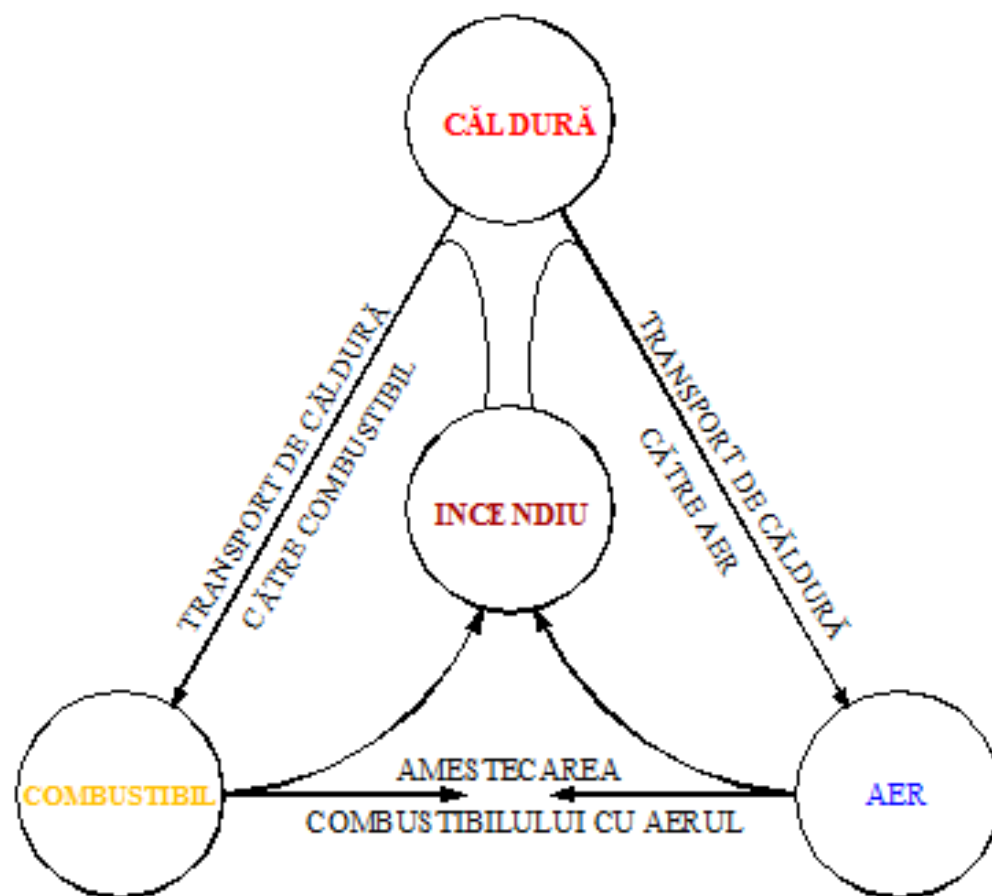


Figura 3.4. Schema generală a incendiului, conform ISO – DTR – 11696/1.

Modul de ardere în timpul incendiilor, deosebit de complex, depinde atât de reacția chimică propriu-zisă, cât și de starea fizică și distribuția combustibilului și de proprietățile mediului înconjurător.

În incendii, majoritatea covârșitoare a materialelor care ard sunt solide. Spre deosebire de gaze și lichide unde arderea are loc întotdeauna sub formă de flacără, arderea solidelor este complexă, putând fi diferențiate mai multe cazuri:

- solide care prin încălzire emit vapori;
- solide care ard în stare solidă (ardere difuzivă în mediu cu deficit de aer);
- solide care prezintă simultan cele două moduri de combustie.

Anumite solide se transformă în vapori fără descompunere, fie direct prin sublimare (camfor), fie prin topire, urmată de vaporizare (parafine). Arderea în aceste cazuri este foarte asemănătoare cu cea a lichidelor, având loc în întregime în fază gazoasă. Pentru majoritatea solidelor este necesară descompunerea chimică sau piroliza, cu generare de specii volatile. Compoziția volatilelor este extrem de complexă, deoarece și natura chimică a solidelor este complexă. Majoritatea solidelor sunt compuși polimerici, cu greutate moleculară mare, naturali sau artificiali.

Marea majoritate a studiilor efectuate până în prezent, în domeniu se referă la propagarea frontului de flacără laminar difuziv, în sens contrar unui curent de aer ce spală suprafața liberă a unei suprafețe solidă sau lichidă, cu degajare de vapori de combustibili.

Suprafața solidului combustibil, se consideră ca fiind semi infinită și la temperatura de degajare a volatilelor.

În general, se consideră că procesul de ardere la suprafața combustibilă se desfășoară astfel: zona frontului de flacără cu temperatura ridicată ( $T_a$ ) încălzește filmul de combustibil (sau suprafața liberă a lichidului în vas adânc, în acest caz luându-se în considerare și procesele de schimb de căldură și masa din zona de "adâncime" de lichid) care vaporizează, în cazul combustibililor lichizi ușori aproape instantaneu. Vaporii combustibili rezultați reacționează cu oxigenul furnizat de curentul paralel de aer și astfel au loc reacțiile de ardere din frontul de flacără. În general modelele tratează arderea difuzivă pentru ca detaliile reacțiilor cinetice pot fi, în acest caz, neglijate considerându-se că viteza de reacție a reactanților în frontul de flacără este infinit mare în comparație cu vitezele de difuzie cu care se deplasează reactanții.

Modelele includ în general stoechiometria chimică, calorimetria arderii, transferul de căldură convectiv al fazei gazoase, radiația gazelor fierbinți din zona frontului de flacără, transferul de masă, vaporizarea combustibilului lichid și proprietățile termice ale filmului de combustibil lichid.

S-a constatat că viteza de propagare a frontului de flacără este puternic influențată de temperatura teoretică de ardere adiabată și de proprietățile termice ale stratului de combustibil. Procesul nu depinde de conductivitatea termică pe direcție paralelă cu sensul de propagare a frontului de flacără.

Mecanismul de ardere la suprafața combustibilă în curent paralel laminar de aer este acceptat în general, ca fiind următorul: căldura din frontul de flacără (fig.3.5.) este transferată către stratul de combustibil din imediata vecinătate a zonei de inițiere a frontului de flacără, în direcția de deplasare a acestuia. Când suprafața stratului de combustibil inactiv din amonte față de punctul de inițiere a flăcării, ajunge la temperatura de vaporizare (degajare volatile), fluxul de căldură suplimentar primit duce la degajarea de vapori de combustibil care, mai departe se comportă ca un veritabil combustibil gazos.

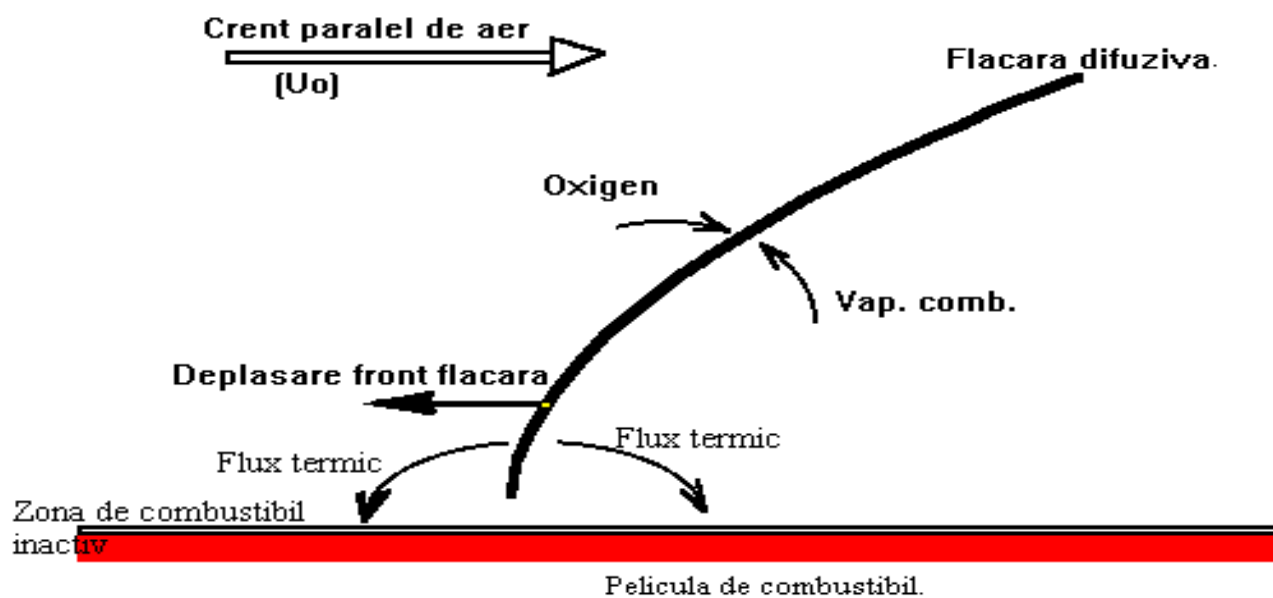


Fig.3.5. Modelul fizic al arderii deasupra stratului de combustibil lichid staționar, în curent paralel de aer.

Moleculele de combustibil se deplasează pe direcție verticală prin difuzie, către zona bogată în oxigen amestecându-se cu acesta și, mai departe, în momentul în care se atinge valoarea stoichiometrică a dozajului se consideră că are loc trecerea în domeniul de reacții rapide de ardere cu degajare de căldură.

De la bun început trebuie precizat că de fapt, reacțiile de ardere apar într-un domeniu de dozaje în jurul valorii stoichiometrice și, mai mult decât atât, apar decalaje în timp și spațiu între combustibilele diferitelor fracții ale vaporilor combustibili ceea ce duce la existența unei anumite grosimi a frontului de flacără.

O parte din energia chimică de reacție degajată în frontul de flacără este transferată către stratul de combustibil lichid inactiv astfel completându-se ciclul energetic necesar menținerii proceselor din frontul de flacără.

Fiecare din aceste procese include o mare diversitate de fenomene fizice dependente de situațiile particulare ale frontului de flacără considerat.

Ca o exemplificare imediată iată cazul particular idealizat al propagării frontului de flacără laminar-difuziv al fazei gazoase de combustibil în sens invers unui curent paralel de aer deasupra unei suprafețe libere de combustibil lichid, pentru care s-a construit un model linear simplu (J.N. DE RIS).

Transferul de căldură către stratul de combustibil inactiv din imediata vecinătate a frontului de flacără are loc atât prin conducție străbătând faza gazoasă și stratul de combustibil, cât și prin radiație. Nu se ia în considerare transferul de căldură convectiv deoarece curentul de aer deviază în mod semnificativ la impactul cu frontul de flacără, zona de degajare de produse de ardere cu temperaturi ridicate și volume specifice foarte mari.

Arderea, care se presupune că are loc numai în faza gazoasă, este privită ca o flacără difuzivă care se apropie foarte mult de suprafața liberă a combustibilului.

Ca în toate modelele fizice de ardere difuzivă, viteza de ardere se consideră că depinde în primul rând de schimbul de masă al reactanților către frontul de flacără și mai puțin de cinetica chimică.

În figura 3.6. este prezentat schematic modelul fizic propus de J.N. DE RIS pentru arderea staționară deasupra unui strat de combustibil lichid în curent paralel de aer presupunându-se că faza gazoasă are proprietăți constante în tot câmpul de soluție și profilul de viteză este uniform.

În tratarea teoretică a fenomenului trebuie ținut cont că avem de a face de fapt, cu un strat limită deformat de apariția reacțiilor chimice de ardere într-o zonă interioară a acestuia împreună cu tot ceea ce decurge din aceasta (temperaturi înalte, expansiune a volumului etc.).

În general, stratul limită poate fi caracterizat ca o regiune a curgerii unui fluid în mișcare, în cadrul căreia are loc o deplasare pe o singură direcție predominantă și unde liniile de curent, fluxurile de căldură și de difuzie a masei sunt semnificative numai transversal pe direcția predominantă de curgere.

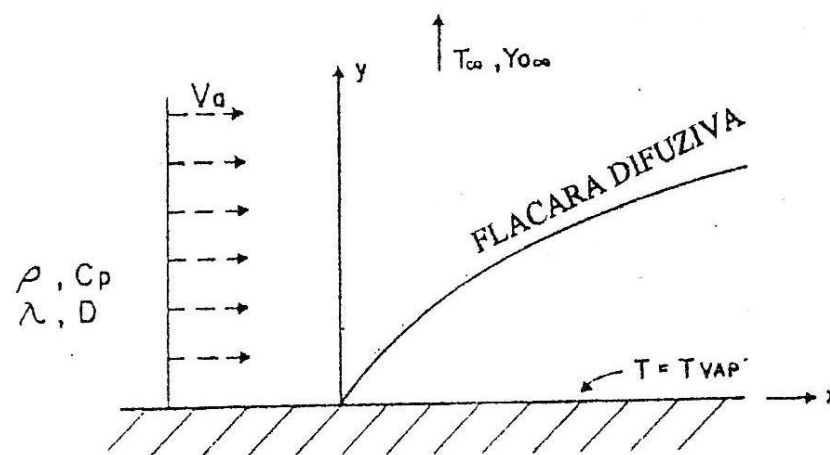


Fig.3.6. Modelul fizic pentru arderea staționară deasupra unui strat de combustibil lichid în curent paralel de aer.

De notat că stratul limită nu apare numai în prezența unui perete solid; două jeturi adiacente de moment, concentrație de specii sau entalpie diferite pot produce linii de curent, fluxuri de difuzie de masă sau fluxuri de căldură transversal pe direcția predominantă de curgere. Desigur, curgerea deasupra unei suprafețe solide în mod uzual duce la apariția stratului limită de curgere. Lucrarea se ocupă de fenomenul reacțiilor chimice din cadrul zonei stratului limită ce se formează deasupra unei pelicule de combustibil lichid; aceste reacții putând avea loc deopotrivă în faza gazoasă cât și la interfața lichid - gaz (solid - gaz).

Mecanismul de descompunere termică a polimerilor se bazează pe sciziunea catenei principale prin transfer de hidrogen intramolecular, transfer de hidrogen intermolecular sau depolimerizare. Prin eliminarea catenelor laterale prin rupere de lanțul principal, rezultă specii cu greutate moleculară mică care se pot volatiliza. Prin crearea de legături chimice între catenele principale adiacente prin îndepărtarea grupărilor legate de catena principală ori prin ciclizarea catenelor laterale rezultă reziduu bogat în carbon.

Celuloza este unul dintre polimerii naturali cel mai răspândit. În cazul polimerilor cu structuri foarte reticulate, producerea volatilizării prin descompunere termică este mult mai redusă datorită formării cărbunelui. Unele rășini fenolice dau până la 60 % reziduu cărbunos. Un astfel de polimer natural este lignina, care leagă structurile celulozice în plantele înalte, conferind putere și rigiditate pereților celulei. Reziduuul cărbunos format va acționa ca un ecran de protecție pentru combustibilul neafectat de dedesubt, modificând desfășurarea procesului de ardere.

### 3.2.2. Arderea polimerilor sintetici

O parte din cea mai importantă sarcină termică în incendii o reprezintă materialele plastice ce se regăsesc sub forma polimerilor sintetici.

Proprietățile care caracterizează materialele plastice depind de structura și forma moleculelor, de forțele intermoleculare și de capacitatea lor de formare. După modul de obținere a acestora, se deosebesc:

- materiale plastice obținute prin polimerizare (polietilena, polistiren, policlorura de vinil, poliacetat de vinil, polimetacrilat, ș.a.);

- materiale plastice obținute prin policondensare - caracterizate printr-o compoziție cu totul deosebită de cea a monomerilor de la care se pornește (poliamide, poliesteri, rășini fenolice poliuretan, ș.a.).

O clasificare importantă este după comportarea lor, la temperaturi înalte:

- *materiale plastice termoplastice* care se modifică reversibil, înmuindu-se prin încălzire și întărindu-se prin răcire; după răcire, produsul fasonat poate fi adus din nou în stare plastică prin încălzire; au în general o structură moleculară sub formă de catenă liniară. În timpul arderii, produc picături de topitură care se aprind ușor, capabile să producă arsuri grave și să declanșeze incendii (pericol mare de incendiu). În absența unei flăcări pilot, printr-o încălzire continuă peste temperatura de înmuiere, materialele termoplastice se topesc și se depolimerizează sau se descompun termic.

- *materiale termorigide* - care odată prelucrate nu mai pot fi aduse în stare plastică prin încălzire; au o structură moleculară tridimensională care la încălzire suferă transformări ireversibile.

Fiind de natură organică, materialele plastice sunt produse combustibile. Gradul de inflamabilitate diferă în funcție de natura polimerului, compoziția rețetei, ș.a. Prezența oxigenului, a grupării nitro și a hidrogenului în molecule favorizează aprinzibilitatea, pe când prezența halogenilor reduce capacitatea de ardere. Prezența plastifianților (materiale de umplutură, de regulă esteri fosforici și esteri ai acidului propionic și ai acizilor grași) intensifică arderea.

Spre exemplificare, o epruvetă din policlorură de vinil plastifiat are temperatura de aprindere de 440°C, iar neplastifiat, temperatura de aprindere de cca. 630°C.

În general, materialele plastice ard cu flacără, fenomen în care apare un front de ardere alimentat de volatilele dezvoltate prin degazeificare. Reziduul compus din substanțe anorganice nu formează jar. Temperatura de aprindere a materialelor plastice este în general ridicată - peste 400°C.

Materialele plastice se comportă diferit la expunerea la flacără. Unele continuă să ardă și după îndepărtarea flăcării de inițiere, iar la altele, arderea încetează după îndepărtarea flăcării, fie ca o consecință a structurii specifice a polimerului, fie a unui tratament de ignifugare. Experimental s-a constatat că :

- plăcile din celuloid, polietilenă, polistiren, stiplex, spumă policlorvinilică, se aprind cu ușurință și continuă să ardă independent după îndepărtarea sursei de flacără, pierderea de greutate fiind mai mare de 20 %;
- la policarbonați, aminoplaste, PVC granule, arderea continuă max. 30 s după îndepărtarea flăcării, pierderea în greutate fiind mai mică de 20 %;
- la unele materiale (PVC dur) arderea încetează imediat după îndepărtarea sursei de aprindere, pierderile în greutate fiind sub 8 %.

Vitezele de ardere variază între 140 g/min (la celuloid) la 24 g/min (polistiren) și 6 g/min (polietilenă).

Aprinderea se face cu mai multă ușurință când flacăra de inițiere acționează la colțurile și muchiile epruvetei, față de situația plasării pe suprafețele plane ale acesteia.

Pentru determinarea vitezei de ardere, în cazul polimerilor sintetici, se utilizează relația :

$$m = \frac{Q_a - Q_p}{L_v} \text{ [kg/m}^2\text{*h]} \quad (3.1.)$$

în care :

- m - viteza masică de ardere [kg/m<sup>2</sup>\*h];
- L<sub>v</sub> - căldura de formare a volatilelor (în cazul lichidelor, căldura de vaporizare), [J/kg];
- Q<sub>a</sub> - fluxul de căldură schimbat cu exteriorul, [W/m<sup>2</sup>];
- Q<sub>F</sub> - fluxul de căldură transmis de la flacără la suprafață, [W/m<sup>2</sup>];
- Q<sub>E</sub> - fluxul de căldură transmis de la sursa de radiație exterioară [W/m<sup>2</sup>];
- Q<sub>p</sub> - fluxul pierderilor de căldură, [W/m<sup>2</sup>].

Experimental s-a constatat că fluxul de căldură transmis de la flacără la suprafață, Q<sub>F</sub>, este proporțional cu viteza de ardere și cu concentrația de oxigen în atmosfera ambiantă, conform relației :

$$Q_F = \xi X_{O_2}^\alpha \quad (3.2)$$

unde :

- ξ, α - constante determinate experimental;
- X<sub>O<sub>2</sub></sub> - fracția molară de oxigen în atmosferă.

Considerând valoarea  $\frac{Q_E - Q_P}{L_v}$  constantă, ca o consecință a condițiilor uzuale de testare (câmp radiant constant, iar pentru Q<sub>E</sub> constant, α = 1), relația (3.1) poate fi scrisă sub forma:

$$m = \frac{\xi X_{O_2}}{L_v} + \frac{Q_E - Q_P}{L_v} \quad (3.3)$$

Se definește parametrul ideal ca fiind raportul dintre fluxul de căldură transmis de la flacără la suprafață și căldura de formare a volatilelor, conform relației:

$$m_{ideal} = \frac{Q_F}{L_v} = \frac{\xi \cdot O_2}{L_v} \quad (3.4)$$

care reprezintă viteza de ardere maximă pe care o poate atinge un material, atunci când toate pierderile de căldură sunt reduse la zero sau compensate de un flux de căldură impus, respectiv Q<sub>E</sub>=Q<sub>p</sub>.

Coroborând relațiile 3.3. și 3.4. rezulta relația 3.5, care exprimă viteza de ardere a unui material:

$$m = m_{ideal} + \frac{\dot{Q}_E - \dot{Q}_p}{L_v} \quad (3.5)$$

În cazul unui incendiu de incintă, fluxul de căldură cu care materialul contribuie la căldura din incintă poate fi calculată cu relația:

$$\dot{Q} = m * \gamma * H_c * A_c \quad (3.6)$$

unde :

$H_c$  - căldura de ardere a volatilelor, [J/kg];

$A_c$  - aria suprafeței combustibilului, [m<sup>2</sup>];

$m$  - viteza masică de ardere [kg/m<sup>2</sup>\*s];

$\gamma$  - un parametru care ține seama de arderea incompletă ( $\gamma = 0,4 \div 0,7$ ).

Notând  $Q_{ef}$  fluxul de căldură ce ajunge efectiv la suprafață, iar  $m = \frac{\dot{Q}_{ef}}{L_v}$  rezultă relația :

$$\frac{\dot{Q}_c}{A_c} = \dot{Q}_{ef} \gamma \frac{H_c}{L_v} \quad (3.7)$$

Relația (3.7) exprimă faptul că fluxul de căldură degajat de un material, care arde într-o incintă, este proporțional cu raportul  $\frac{H_c}{L_v}$ , numit raport de combustibilitate. Solidele au pentru acest raport valorile: 3 (stejar), 6,6 (PVC granule) și 30 (spumă polistiren). Lichidele combustibile au valori mult mai mari, de exemplu pentru heptan, această valoare este de 93. O excepție o reprezintă metanolul cu valoarea de 16,5, datorită căldurii latente de vaporizare mari și valorii relativ mici pentru  $H_c$ .

În cazul solidelor care carbonizează trebuie inclusă și căldura degajată în urma oxidării cărbunelui, care, în mod normal, arde foarte lent într-un incendiu real, o mare parte după ce arderea cu flacără a încetat.

Ignifuganții pot influența raportul de combustibilitate prin modificarea lui  $H_c$  și/ sau  $L_v$ , fie schimbând mecanismul pirolizei, fie diluând combustibilul prin ingredientii de umplutură (ca de exemplu hidratul de aluminiu).

### 3.2.3. Arderea lemnului;

Spre deosebire de polimerii sintetici, lemnul este un material neomogen și anizotrop. Este un amestec complex de polimeri naturali cu greutate moleculară mare: celuloză (50%), semi-celuloză (25%), lignina (25%). Proporțiile variază de la specie la specie.

**Celuloza** este unul din principalii constituenți ai celulelor vegetale și, de aceea, are un rol esențial în comportarea la foc a produselor cu această origine. Bumbacul este practic celuloză pură, alte fibre textile (inul, cânepa, iuta, ș.a.) sunt foarte bogate în celuloză. Pielele, hârtia conțin în proporție mare celuloză. Celuloza este un polizaharid, produs prin polimerizarea glucozei, cu formula moleculară  $(C_6H_{10}O_5)_n$  unde  $n = 600 \div 900$  pentru celuloza din lemn și  $n = 2000$  pentru celuloza din bumbac. În condiții normale (20°C, 65% umiditate relativă) celuloza formează un hidrat stabil  $(C_6H_{10}O_5 \cdot 1/2 H_2O)$ , ceea ce corespunde cu 5,25% apă. Acest hidrat reține prin absorbție încă 2 ÷ 3 % apă

suplimentară. Celuloza prezintă o structură liniară aparte, care permite moleculelor să se alinieze în fascicule de microfibrile, care îmbunătățesc rezistența structurală și rigiditatea pereților celulei. Aceste micro-fibrile sunt legate împreună în timpul procesului de lignificare, când semi-celuloza și lignina sunt disponibile în planta care crește.

**Semiceluloza** are o structură similară, dar bazată pe pentoză.

**Lignina** are o structură mult mai complexă. Este formată din carbon, hidrogen, oxigen, dar nu se cunoaște precis proporția componentelor și structura chimică. Este o substanță cu caracter aromatic în care inelul aromatic este legat de o catenă cu trei atomi de carbon. Există mai multe tipuri de lignină, care depind de natura speciei din care provine.

Cei trei constituenți principali ai lemnului se descompun și generează volatile la temperaturi diferite: semiceluloza 200-260°C, celuloza 240- 350° C, lignina 280-500°C.

Atunci când o mică cantitate de celuloză este încălzită lent în absența aerului, ea începe să piardă apa de hidratare. Atât timp cât apa absorbită nu este eliminată, temperatura internă nu depășește 60÷70°C. După eliminarea apei, se inițiază o reacție de descompunere ireversibilă, evidențiată printr-o **îmbrunare** accentuată. Reacția predominantă este o depolimerizare cu formarea unor compuși de tipul anhidro - 1,6 glucopiran. O descompunere pisolitică mai accentuată, în absența aerului, duce la formarea a patru categorii de produse: - gaze necondensabile; - produși pirolignoși, bogați în apă; - gudroane; - cărbune de lemn. Proporția relativă a acestor patru constituenți variază în funcție de viteza de creștere a temperaturii, de masa aflată în combustie și de proprietățile fizice, mai ales de porozitate.

Gazele rezultate din reacție cuprind CO<sub>2</sub>, CO , H<sub>2</sub>, precum și o mică cantitate de hidrocarburi, în special metan. Primele gaze apar la cca. 200°C.

Producții pirolignoși apar spre 200 °C, dispărând în jur de 350 °C și au în componență: apă 70%, acid acetic 20% , acid propionic 5%, formol 3% ș.a. Producții rezultați din distilarea uscată a lemnului conțin în plus cantități importante de alcool metilic.

Gudroanele apar după 300°C. Sunt produse complexe (mai mult de 100 de compuși organici diferiți, în proporții foarte variabile) cu putere calorifică între 20000 - 30000kJ/kg.

Cărbunele de lemn variază, de asemenea, atât în proporție, cât și în compoziție. Puterea calorifică inferioară crește pe măsura îmbogățirii în carbon, atingând 29000kJ/kg la 1000 °C.

Atunci când descompunerea pirolitică, în atmosferă săracă în oxigen, are loc într-o masă suficientă de celuloză, se constată (când temperatura ambiantă atinge 250 ÷ 300°C) o creștere rapidă a temperaturii în centrul masei de celuloză, care poate depăși cu mult temperatura exterioară. Această reacție exotermă internă, mai ales în cazul lemnului, are o importanță deosebită în inițierea și dezvoltarea arderilor lente. Temperatura la care este inițiat acest fenomen variază în funcție de masa și geometria cantității de celuloză.

La încălzirea lemnului peste (400 ÷ 450) °C sau la arderea lui, între 15 - 25 % din masă rămâne ca reziduu cărbunos, majoritatea provenind din conținutul de lignină. Numai 50 % din lignină se volatilizează.

La încălzirea peste 300 °C, α - celuloza pură, provenită din bumbac, fără impurități anorganice, generează doar 5 % cărbune.



Ignifugații utilizați pentru îmbunătățirea comportării la foc a lemnului, favorizează procese de formare a cărbunelui. Totodată, produsele de ignifugare care conțin fosfați și borați modifică compoziția volatilelor, în favoarea gudroanelor. Ca urmare, căldura de ardere a volatilelor descrește, ceea ce va diminua cantitatea de căldură transferată de la flacără către suprafață. Stratul de cărbune va proteja lemnul neafectat, de dedesubt, fiind necesar un flux de căldură mai mare pentru a genera volatile.

Din cauza structurii fibroase complexe, comportarea la foc a lemnului nu poate fi redusă la ecuații simple de tipul 3.1. Ecuația se complică prin prezența stratului de cărbune și prin interacțiunile din interiorul cărbunelui fierbinte. Astfel, pot interveni oxidări ale straturilor inferioare, prin difuzia unor mici cantități de oxigen. Fiind un proces exoterm, va contribui cu o cantitate suplimentară de căldură la descompunerea lemnului și va reduce căldura de gazeificare.

Fiind anizotrop, conductivitatea termică paralelă cu fibra este de cca. 2 ori mai mare ca cea perpendiculară pe fibră, iar permeabilitatea la gaze de peste 100 de ori. Experimental se observă că volatilele generate de către lemnul încălzit se degajă mai ușor de-a lungul fibrei decât perpendicular pe suprafață: apar jeturi de volatile și flăcări la capetele plăcilor din lemn sau în dreptul nodurilor.

În procesul arderii produselor din lemn se disting următoarele faze:

- **FAZA DE ÎNCĂLZIRE, caracterizată de temperaturi:  $T < 100$  °C.** Aceasta constă în încălzirea lemnului până la o temperatură de 100 °C, în prima fază de proces și începerea procesului de eliminare a umidității, la temperatură constantă. Procesul corespunzător acestei faze este prezentat schematic în figura 3.7.

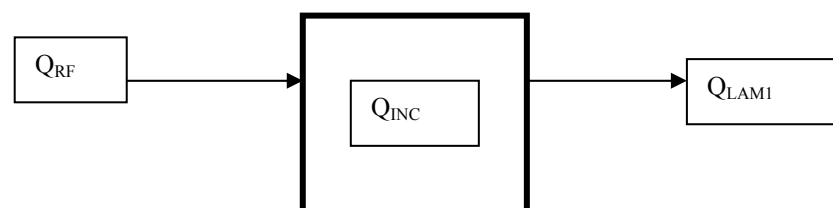


Fig. 3.7. Schema de proces pentru faza de încălzire.

Legendă:

$Q_{INC}$  – flux de căldură disponibil pentru încălzirea stratului

$Q_{RF}$  - flux de căldură transmis prin radiația mediului din focar, la temperatura focarului

$Q_{LAM1}$  - flux de căldură prin conducție spre stratul vecin în adâncime

- **FAZA DE DEGAJARE A UMIDITĂȚII LA  $T = 100$  °C.** În această fază stratul încălzit, până la o temperatură de 100 °C, începe procesul de eliminare a umidității, la temperatură constantă. Fluxul de căldură destinat vaporizării apei, este reprezentat de diferența dintre fluxul de căldură transmis prin radiație și fluxul de căldură transferat prin conducție ( $Q_{RF} - Q_{LAMI}$ ). Procesul corespunzător acestei faze este prezentat schematic în figura 3.8.

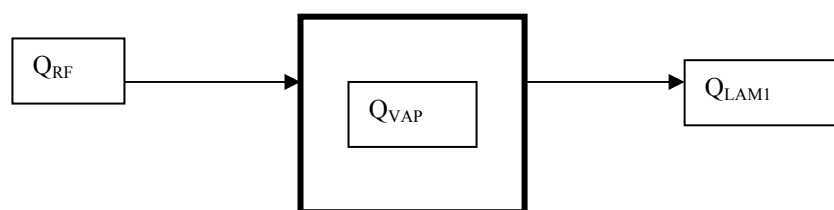


Fig. 3.8. Schema de proces pentru faza de degajare a umidității.

Legendă:

$Q_{VAP}$  – flux de căldură disponibil pentru vaporizarea umidității

$Q_{RF}$  - flux de căldură transmis prin radiația mediului din focar, la temperatura focarului

$Q_{LAMI}$  - flux de căldură prin conducție spre stratul vecin în adâncime.

- **FAZA DE ÎNCĂLZIRE  $T = 100 \div 280$  °C.** În această fază, stratul se încălzește până la o temperatură de 280 °C, temperatura la care începe procesul de eliminare a volatilelor, proces ce se desfășoară în intervalul de temperaturi: 280 ÷ 380 °C. Procesul corespunzător acestei faze este prezentat schematic în figura 3.9.

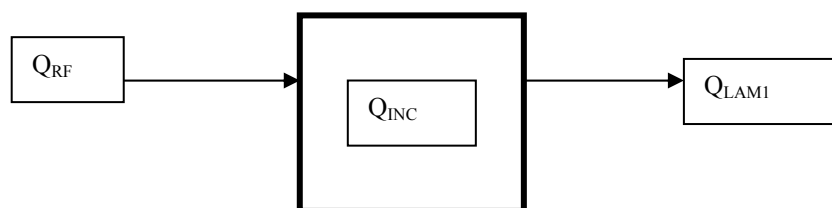


Fig. 3.9. Schema de proces pentru faza de încălzire până la 280°C.

Legendă:

$Q_{INC}$  – flux de căldură disponibil pentru încălzirea stratului

$Q_{RF}$  - flux de căldură transmis prin radiația mediului din focar, la temperatura focarului

$Q_{LAMI}$  - flux de căldură transmis prin conducție spre stratul vecin, în adâncime

**- FAZA DE ÎNCĂLZIRE ȘI ELIMINARE A VOLATILELOR  $T = 280 \div 380$  °C.**

Stratul se încălzește până la temperatura de 280°C, până la începerea procesului de eliminare a volatilelor. Volatilele se elimină în intervalul de temperaturi cuprins între 280°C și 380°C. Fizic, procesul este cu intensitate crescătoare, exponențial cu temperatura, deoarece este un proces de echilibru chimic, care respectă legea exponențială a lui Arrhenius  $K = A * \exp\left(-\frac{E}{R*T}\right)$ , care arată că viteza de reacție (degajare a volatilelor, „K”) crește exponențial cu temperatura de proces (T), dar va scădea liniar cu scăderea concentrației de volatile, (C), ce se formează în strat. Procesul corespunzător acestei faze este prezentat schematic în figura 3.10.

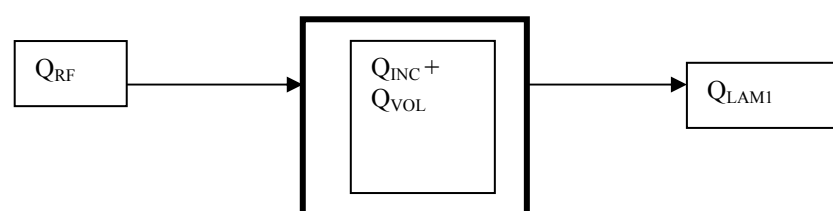


Fig. 3.10. Schema de proces pentru faza de încălzire și eliminarea volatilelor.

Legendă:

$Q_{INC}$  – flux de căldură disponibil pentru încălzire stratului

$Q_{VOL}$  – flux de căldură necesar eliminării volatilelor

$Q_{RF}$  - flux de căldură transmis prin radiația mediului din focar, la temperatura focarului

$Q_{LAM1}$  - flux de căldură transmis prin conducție spre stratul vecin, în adâncime

Se remarcă faptul că se consumă o cantitate de căldură  $Q_{VOL}$  pentru eliminarea volatilelor. Similar căldurii de vaporizare a apei, căldura de degajare a volatilelor este o energie consumată pentru procesul de degajare a unor substanțe. Literatura de specialitate, recomanda pentru această energie o valoare stabilită experimental de 1100 kJ/kg .

**- FAZA DE ÎNCĂLZIRE  $T = 380 \div 600$  °C.** După terminarea degajării volatilelor, la temperatura de 380 °C, stratul se încălzește până la o temperatură de 600°C, temperatura la care începe procesul intens de ardere a carbonului fix. Limita de 600°C pentru începutul proceselor intense de ardere a carbonului fix este aleasă oarecum arbitrar, având în vedere fenomenul fizic de ardere a carbonului cu o viteză exponențial crescătoare cu temperatura absolută de proces. Totuși, rulând programe de calcul cu diferite temperaturi convenționale de începere a reacției reducătoare a carbonului între 500°C și 800°C s-a ajuns la o variație de timp total de ardere a stratului de ordinul sub 10 secunde, ceea ce este neglijabil în ansamblul procesului de ardere a stratului. Procesul corespunzător acestei faze este prezentat schematic în figura 3.11.

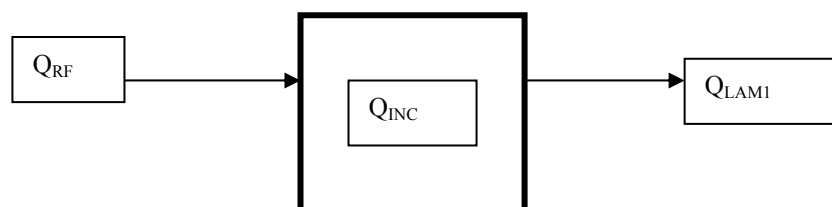


Fig. 3.11. Schema de proces pentru faza de încălzire în intervalul de temperatură, cuprins între 380°C ÷ 600°C schema de proces este ilustrată mai jos.

Legenda:

$Q_{INC}$  – flux de căldură disponibil pentru încălzirea stratului

$Q_{RF}$  - flux de căldură transmis prin radiația mediului din focar, la temperatura focarului

$Q_{LAM1}$  - flux de căldură transmis prin conducție spre stratul vecin, în adâncime

- **FAZA DE ARDERE A CARBONULUI FIX LA  $T > 600$  °C.** După fazele de încălzire, uscare respectiv degajare a volatilelor și încălzire finală la 600 °C are loc faza de ardere a cocsului, adică a carbonului fix, care rezultă după degajarea volatilelor.

La temperaturi mai mari de 600°C, reactivitatea carbonului reprezintă principala caracteristică în procesul de ardere și în consecință devin predominante procesele de reducere de tipul:  $CO_2 + C = 2CO$ .

Indiferent de cinetica de ardere a carbonului la temperatură ridicată, în afara stratului limită a masivului iese  $CO$ , ca produs de ardere, acesta urmând să-și continue procesul de oxidare, până la  $CO_2$ , în volumul camerei de ardere.

Premiza unui astfel de proces duce la stabilirea unor fluxuri de oxigen necesare pentru consumarea carbonului. Pentru stabilirea fluxului de oxigen se au în vedere următoarele relații:

- molar:  $C + \frac{1}{2} O_2 = CO$ ;
- gravimetric:  $12 \text{ kg C} + 16 \text{ kg } O_2 = 28 \text{ kg CO}$ ;
- fluxul masic de  $C = f_C$ ;
- fluxul masic de  $O_2 = f_{O_2}$ ;
- fluxul relativ de masă al oxigenului  $f_{O_2} = 16/12 * f_C$ ;

Fluxul masic de oxigen ajunge la suprafața masivului prin difuzie, după care, în contact cu suprafața de carbon are loc reacția chimică de oxidare. Timpul de difuzie este cel care guvernează timpul procesului, deoarece reacția oxigen-carbon este atât de rapidă încât timpul ei este neglijabil.

În literatura de specialitate timpul de ardere a carbonului fix este determinat pe baza unor constante experimentale care sunt cuprinse în constanta timpului de ardere a carbonului fix. Ca exemplu se menționează relația larg adoptată în practică,

$$\tau_r = K_D * d^m \quad [*] \quad (3.8)$$

unde pentru fiecare tip de combustibil se dau constantele  $K_D$  și  $m$  având ca parametru și temperatura.

În tabelul de mai jos sunt prezentate valori ale constantelor  $K_D$  și  $m$  pentru combustibili solizi de tip ligniți, după (N. Pănoiu ș.a. – Instalații de ardere a combustibililor solizi).

Tabelul 3.2. Valorile constantelor  $K_D$  și  $m$  pentru combustibili solizi.

Temperatura		700	800	900	1000	1100	1200
$K_D$	mg/s/cm	572÷910	520÷873	440÷670	365÷570	346÷540	220÷450
$m$	-	1.81÷2.10	1.71÷2.02	1.73÷2.08	1.87÷1.99	1.84÷2.05	1.97÷1.89

În literatura de specialitate, pentru stratul de lemn în ardere cu gazeificare, exista o metodă de calcul a timpului de ardere a carbonului fix, care ține seama de următoarele particularități:

- stratul este scaldat de mediul cu oxigen din camera de ardere cu viteza  $W_{REL}$ ;
- concentrația de oxigen din mediul din focar este determinată de excesul de aer în procesul de ardere și este media între excesul de aer final și excesul de aer la terminarea degajării volatilelor;
- difuzia oxigenului la suprafața masivului se face prin stratul limită, în care are loc variația concentrației de oxigen de la cea din focar  $C_{O_2\text{ foc}}$  la cea de pe suprafață  $C_{O_2s} = 0$ . Stratul limită este determinat de viteza relativă a aerului și de proprietățile fizice ale mediului din camera de ardere;
- bilanțul termic al stratului determină încălzirea lui: din căldura de reacție  $Q_{AR}$  un flux pleacă cu conținutul de căldură al gazelor CO degajate la temperatura de ardere  $Q_{CO}$  și un flux de căldură pleacă transmis prin radiație de suprafața stratului  $Q_{RP}$  la temperatura stratului. Un flux de căldură este adus cu oxigenul de difuzie care vine cu temperatura din focar. Suprafața stratului primește un flux de căldură prin radiația mediului din focar  $Q_{RF}$ , la temperatura focarului. Stratul primește sau cedează un flux de căldură prin convecție care este egal cu conducția prin stratul limită  $Q_{CL}$ .
- grosimea stratului variază ca urmare a transformării C --> CO cu mărirea fluxului de masă  $f_C = f_{O_2} * 12/16$ . Datorită faptului că lemnul are un conținut de cenușă de ordinul 1%, deci neglijabil, dimensiunea finală a stratului este nulă.

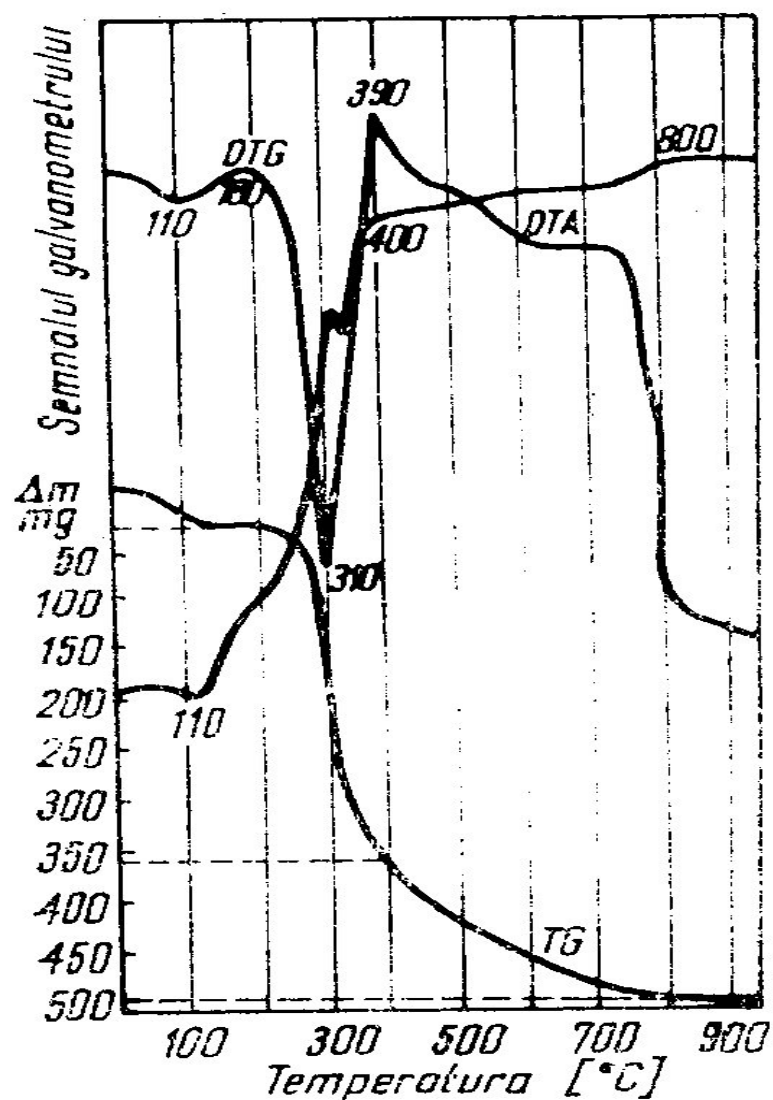
Cele mai importante date privind procesul de ardere al unei substanțe, sunt furnizate de analiza denumită „Derivatografie termică”, care are la bază următoarele metode de analiza termică:

- analiza termica diferențială: DTA;
- gravimetria termică: TG;
- gravimetria termică derivată: DTG.

Metodele de analiza termica pun in evidenta transformările fizice si chimice, care au loc in solide, sub influenta temperaturii. Temperatura este una dintre mărimile, care definește starea, echilibrul si cinetica sistemelor materiale, ea influențând aproape toate constantele fizice si transformările chimice ale substanțelor.

Interpretarea derivatogramelor permite stabilirea intervalelor de temperatura și fluxurile de căldură necesare sau obținute, în fazele de uscare, de degajare și ardere a volatilelor, de ardere a zidului cărbunos. În același timp sunt prezentate vitezele și temperaturile optime la care au loc principalele faze ale arderii.

Literatura de specialitate, furnizează derivatograme pentru diferite materiale combustibile solide. Dintre acestea, prezintă interes pentru lucrare de față, derivatogramele pentru lemn (fig. 3.7 derivatograma unei probe de lemn) și pentru cărbune (fig. 3.8 derivatograma unei probe de cărbune).



Curbele termice ale desului lemnos prezentate în figura anterioară (fig. 3.12. derivatograma unei probe de lemn), arată pierderea apei până la 180 °C, urmată de descompunerea oxidativă a celulozei, respectiv ligninei. Descompunerea celulozei se face prin depolimerizare, oxidare și eliminarea grupelor OH.

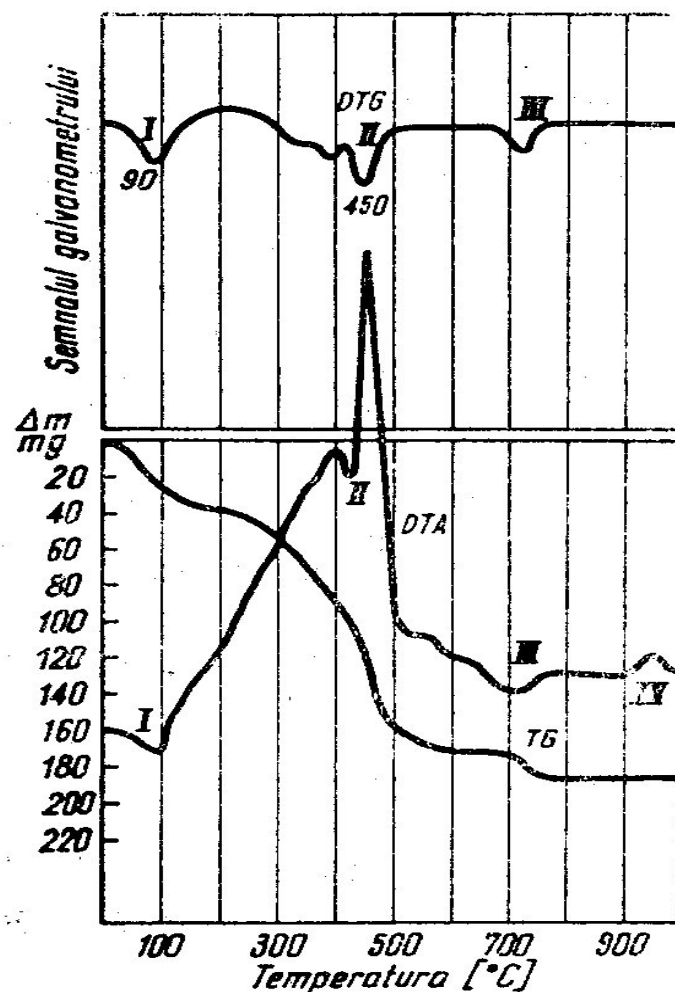


Figura 3.13. Derivatograma unei probe de cărbune.

În figura de mai sus (fig 3.13. derivatograma unei probe de cărbune), este prezentată derivatograma unei probe de cărbune, care conține cele trei curbe termice.

Spațiul derivatogramei este împărțit în patru zone, care corespund următoarelor faze ale arderii:

- zona I: faza pierderii endoterme a vaporizării apei;
- zona II: degajarea și arderea volatilelor și a carbonului;
- zona III: descompunerea carbonaților existenți;
- zona IV: reorganizarea structurală a caolinitului.

#### 3.2.4. Arderea materialelor textile.

Mai mult de 80 % din nomenclatorul articolelor textile se aprind cu ușurință, dar sunt luate în considerare pentru stabilirea pericolului de incendiu în special produsele textile din incinte cu aglomerări de persoane (teatre, magazine ș.a.), din locuințe (cuverturi de pat, perdele ș.a.), din spitale, hoteluri, cele utilizate în construcția mijloacelor de transport (aero, feroviar, ș.a.), cele destinate costumelor de protecție contra focului.

Din experimentări rezultă că principalii parametri care caracterizează comportarea la foc a materialelor textile (ale căror valori depind de metoda de încercare folosită) sunt :

- ✓ timpul de aprindere;
- ✓ timpul de ardere al epruvetei după îndepărtarea flăcării pilot sau după stingerea flăcării;
- ✓ incandescența remanentă - timpul scurs de la încetarea arderii cu flacără a epruvetei până la stingerea jarului (cărbune incandescent);
- ✓ lungimea de ardere - lungimea degradată sub acțiunea flăcării.

Cercetările experimentale existente în literatura de specialitate furnizează evaluări calitative privind arderea materialelor textile. Astfel :

- pentru a realiza aceeași temperatură în sistem, bumbacul, din care sunt confecționate majoritatea materialelor textile actuale, are nevoie de o absorbție de căldură de 170 de ori mai mică ca la lemn. Ca urmare, aprinderea va putea fi realizată de la surse de nivel termic redus (muc de țigară incandescent, flacără de chibrit, particule incandescente de la sobe ș.a.). Bumbacul este aproape celuloză pură și va arde conform modelului arderii mocnite. În condiții egale de testare, fibrele de bumbac se aprind și ard mai repede decât fibrele de viscoză, care conțin o cantitate importantă de substanțe anorganice;

- durata de aprindere și viteza de propagare a flăcării pentru materialele textile depinde de greutatea materialului pe unitatea de suprafață și de structura țesăturii. Țesături subțiri din bumbac ard foarte repede, iar serjul de lână cu greutate mult mai mare ( $258 \text{ g/m}^2$  față de  $52 \text{ g/m}^2$  la voalul din bumbac) are o durată de aprindere și viteză de ardere de peste 2 ori mai mică;

- în cazul țesăturilor din fibre sintetice, poliamidice și poliesterice, arderea încetează după îndepărtarea sursei, iar zona carbonizată este mică. În unele cazuri, materialul se topește, "fuge" din calea flăcării;

- materialele termostabile de fabricație relativ recentă (Nomex, Kermel) se caracterizează printr-o structură moleculară compactă, care le conferă proprietăți ignifuge superioare și aprinzibilitate foarte redusă. La temperatura de cca.  $400^\circ\text{C}$  se transformă într-un produs carbonizat friabil.

- în cazul unor materiale stratificate, au loc acțiuni reciproce între țesăturile componente.

- aprinderea epruvetei din material textil într-un punct situat la marginea inferioară determină propagarea inițială a frontului de flacără și pe lateral, nu numai în sus, iar propagarea laterală frânează viteza de propagare a flăcării în direcție longitudinală. Aprinderea pe toată lățimea marginii de jos a epruvetei constituie cazul cel mai favorabil de propagare a arderii. Viteza de propagare crește de la  $3,8 \text{ cm/s}$  la  $6,3 \text{ cm/s}$  pentru bumbac, de  $1,4$  ori la viscoză, de  $1,6$  ori la PE/bumbac ș.a..

### 3.3. Propagarea fumului în clădiri

Fumul și produsele gazoase, rezultate în urma arderii, la incendii, constituie pericole reale pentru viața omului.

Gazele de ardere provenite de la materialele combustibile obișnuite conțin, în general, dioxid de carbon, oxid de carbon și acid clorhidric care sunt deosebit de nocive pentru viața omului, chiar la concentrații foarte reduse.



Fumul se prezintă, de regulă, sub forma unei mase formată din gaze și particule solide și lichide foarte fine (combustibil nears, funingine, gudroane, cenușă etc.), a cărui culoare poate fi de la cenușiu până la negru, dar, în funcție de compoziția chimică a materialelor, poate prezenta și diverse alte nuanțe coloristice însoțite, în unele cazuri, de anumite mirosuri și gusturi specifice.

Fumul se propagă în clădiri cu o viteză net superioară incendiului propriu-zis, inundând spațiile înconjurătoare, făcând inutilizabile căile de evacuare. Din datele experimentale rezultă că, în general, concentrațiile periculoase ale fumului pe căile de evacuare clasice, executate din materiale incombustibile, se pot forma în timp foarte scurt. cca 3-4 minute, cu mult înainte de atingerea parametrilor critici de temperatură. Fumul fiind toxic, provoacă asfixierea persoanelor, chiar situate departe de focar, fiind, în unele cazuri, principala cauză de deces în incendiu. În plus, fumul degradează materialele de construcție aflate în zona adiacentă focarului, slăbește rezistența elementelor metalice de structură ale clădirii și împiedică apropierea de focar a forțelor de intervenție.

Mișcarea particulelor de fum de la focarele de incendiu în mediul înconjurător poate avea loc prin difuzie, convecție naturală sau forțată.

În cazul arderilor lente, de regulă mocnite (bumbac, lemn, PVC), generarea căldurii este lentă, iar deplasarea particulelor de fum are loc prin difuzie, repartizându-se uniform în întreaga încăpere. Totodată, are loc și o stratificare a fumului, fumul se acumulează în straturi cu temperaturi descrescătoare către părțile inferioare ale incintei.

În cazul arderilor normale, datorită formării curenților turbionari de gaze de ardere fierbinți și aer, deplasarea particulelor de fum are loc prin convecție. Particulele de fum, formând un con răsturnat cu vârful în jos, deasupra focarului. Pe măsura deplasării în sus a conului, are loc o amestecare a particulelor de fum și gazelor de ardere cu aerul înconjurător, ceea ce determină răcirea amestecului și, ca urmare, micșorarea vitezei de deplasare a particulelor de fum.

Problematika degajărilor de fum, la incendii în clădiri, este strâns legată de durata de evacuare, în siguranță, a ocupanților.

Componentele timpului de evacuare pot fi exprimate prin relația:

$$t_a + t_b + t_c < t_n \quad (3.9)$$

în care :

$t_a$  - reprezintă intervalul de timp dintre momentul apariției focarului și momentul sesizării incendiului, [s];

$t_b$ - reprezintă intervalul de timp dintre momentul sesizării incendiului și începerea evacuării, [s];

$t_c$ - reprezintă intervalul de timp necesar parcurgerii căilor de evacuare până la un loc sigur, [s];

$t_n$ - reprezintă intervalul de timp în care produsele de ardere ating concentrații periculoase pentru ocupanți, [s].

Pentru a se asigura condiții de siguranță ocupanților din analiza relației (2.9), se observă că, practic,  $t_a$  se poate reduce prin existența unei instalații automate de detecție a incendiilor. De asemenea  $t_b$  poate fi redus prin existența unei instalații de alarmare, care trebuie să lucreze în combinație cu instalația de detectare. Valoarea lui  $t_c$  nu se poate modifica decât în mică măsură,

deoarece aceasta depinde de foarte mulți factori, ca de exemplu: agilitatea persoanelor (vârsta, sexul, copii, bolnavi, handicapați etc.), geometria clădirii, sistemele de securitate, instalație etc. O modalitate de asigurare a unui grad convenabil de siguranță pentru oameni o constituie realizarea unor căi de evacuare alcătuite din materiale incombustibile și cu trasee de parcurs de lungimi reduse.

Mișcarea fumului în clădiri este cauzată de:

- diferența de temperatură dintre exterior și interior (forțe de tip Arhimede);
- energia termică generată de incendiu (presiunea termică);
- presiunea cauzată de curenții de aer exteriori (vânt);
- sistemele de climatizare din clădire.

Acești factori au o pondere mai redusă sau mai însemnată, în funcție de locul unde s-a produs incendiul (zone calde) sau la depărtare mare de acestea (zone reci). În zonele calde, deplasarea fumului este condiționată, în principal, de fluxul de căldură generat prin ardere.

În zonele reci, în care cantitatea de căldură acumulată în fum și gazele de ardere este redusă, deplasarea fumului este condiționată de diferența de temperatură dintre interior și exterior, acțiunea vântului și a sistemelor de climatizare.

#### a) Diferența de presiune cauzată de forțele ascensionale naturale.

Dacă fumul este la o temperatură mai ridicată decât cea a mediului ambiant, el se va ridica, iar forța ascensională pe unitatea de volum va fi dată de relația:  $g(\rho_o - \rho)$ , în care:

$\rho_o$  - reprezintă densitatea aerului ambiant,  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ;

$\rho$  - reprezintă densitatea fumului,  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ ;

$g$  - accelerația gravitațională,  $[\text{m}/\text{s}^2]$ .

La clădirile înalte, în plus față de forma ascensională creată direct de incendiu, trebuie luat în considerație efectul de coș (efectul STACK) - forțe ascensionale datorate diferenței de temperaturi dintre mediul exterior și cel interior.

Dacă temperatura din interiorul clădirii este mai mare decât cea din exterior, va exista tendința naturală a aerului de a intra pe la partea inferioară și de a ieși pe la partea superioară a clădirii. În situația în care temperaturile la exterior și la interior se inversează, atunci direcția de curgere a aerului se inversează și ea.

Pentru calculul diferenței de presiune, se consideră un canal vertical, de înălțime  $H$ , care are o deschidere numai la partea inferioară. Considerând că temperatura interioară este  $T_i$  și cea exterioară este  $T_o$  și că presiunea exterioară la nivelul solului este  $p_o$ , atunci presiunea la înălțimea  $H$ , în interior și în exterior sunt date de relațiile:

$$p_i(H) = p_o - \rho_i * gH, [\text{Pa}] \quad (3.10)$$

și

$$p_e(H) = p_o - \rho_o * gH, [\text{Pa}] \quad (3.11)$$

Diferența de presiune dintre interior și exterior, la partea superioară va fi:

$$\Delta p = (\rho_o - \rho_i) * g * H, [\text{Pa}] \quad (3.12)$$

Dacă canalul are deschideri atât la partea inferioară, cât și la partea superioară și  $T_i > T_o$ , atunci va exista tendința naturală de ridicare a aerului în canal.

În zona în care  $p_o = p_i$ , apare planul neutru, în care aerul nici nu intră și nici nu iese din clădire. Diferența de presiune, pentru orice înălțime „h” deasupra planului neutru este dată de relația:

$$\Delta p = (\rho_o - \rho_i) \cdot g \cdot h, [\text{Pa}] \quad (3.13)$$

În clădirile reale, deschiderile sunt dispuse pe o mare parte din circumferință și la nivele diferite (geamuri, uși etc.). Deasupra planului neutru, dacă  $T_i > T_o$ , fumul va ieși înspre exterior, iar sub acesta va intra aer din exterior, generându-se astfel un curent ascensional. În acest fel, se explică puternica acumulare de fum la părțile superioare ale clădirii.

În cazul în care temperatura exterioară este mai mare decât cea de la interior, aerul va intra în clădire pe la părțile superioare planului neutru, conducând la invadarea cu fum a spațiilor de sub acesta.

Relația (3.13), având în vedere că  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$  și considerând că, greutatea moleculară a fumului se poate asimila cu cea a aerului se poate rescrie sub forma:

$$\Delta p = 3,46 \times 10^3 (1/T_o - 1/T_i) H, [\text{Pa}] \quad (3.14)$$

Semnificația efectului de coș constă, deci, în aceea că poate deplasa foarte eficient fumul rece, în întreaga clădire.

#### b) Presiunea generată de incendiu.

Arderea materialelor într-un compartiment, generează temperaturi înalte care au ca efect producerea forței ascensionale a gazelor de ardere ce se ridică la partea superioară și pot ieși din camera incendiată în exteriorul sau în interiorul clădirii prin deschideri (geamuri, uși, goluri de ventilație etc.).

Relația de calcul pentru valoarea presiunii termice generate de incendiu este:

$$0,25 (A_F \cdot m / T_o) \cdot T_f \leq \Delta p \leq 1,0 (A_w \cdot m / T_o) \cdot T_f \quad (3.15)$$

în care:

$T_f$  - temperatura în compartimentul de incendiu, [K];

$T_o(K)$  - temperatura ambiantă, [K];

$A_F$  - aria deschiderii, [m<sup>2</sup>];

$m$  - viteza de ardere, [mm/min.].

#### c) Diferența de presiune generată de vânt.

Mișcarea fumului în interiorul unei clădiri poate fi influențată și de repartiția de presiune pe pereții exteriori, cauzată de curenții de aer externi (vânt).

Distribuția exterioară a presiunii depinde de numeroși factori, cei mai importanți fiind viteza și direcția curentului de aer, cât și înălțimea și geometria clădirii. În anumite cazuri, diferența de

presiune creată de vânt poate fi mai importantă decât alte forțe naturale sau artificiale care influențează deplasarea fumului în clădire.

În general, vântul produce o suprapresiune pe fața sau pe fețele clădirii situate pe direcția de deplasare a curenților de aer exteriori și o depresiune pe fețele opuse ale clădirii. Relația de calcul este dată de formula:

$$\Delta p = \frac{u^2}{20,16T_0}, [\text{Pa}] \quad (3.16)$$

în care:

$u$  - viteza curenților de aer, [m / min.];

$T_0$  - temperatura ambiantă exterioară, [K].

De exemplu, la o viteză a vântului de 7 m/s și temperatură exterioară de 293 K se va produce o diferență de presiune  $\Delta p = 30$  Pa (între fața expusă și fața neexpusă a clădirii) suficient de mare ca să modifice mișcarea inițială a fumului în clădire cauzată de incendiu și de efectul de coș.

#### d) Influența sistemelor de condiționare a aerului.

Prin circulația forțată a aerului care se produce în procesul de condiționare, fumul poate fi transportat la distanțe foarte mari de locul de origine. Chiar și în cazul când această instalație nu funcționează, canalele de ventilație constituie căi prin care fumul (cauzele prezentate la punctele a – diferența de presiune cauzată de forțele ascensionale naturale, b - presiune a generată de incendiu, c - diferența de presiune generată de vânt) se poate propaga la mare distanță de focarul inițial.

#### e) Cantitatea de fum produsă la incendiu.

Volumul produselor de combustie care se degajă la ardere este relativ scăzut comparativ cu volumul de aer din amestecul total. Din acest motiv, cantitatea de fum generată la incendiu se poate aproxima cu cantitatea de aer care intră în amestec. Luând în considerare și dependența, stabilită experimental, a fluxului de aer care intră în amestec cu gazele de ardere de aria combustibilului care arde, se poate estima cantitatea de fum cu relația:

$$M = 0,096 P \rho_0 \gamma^{3/2} (g T_0 / T)^{1/2} [\text{kg/s}] \quad (3.17)$$

unde:

$M$  - viteza de producere a fumului, [kg/s];

$P$  - perimetrul ariei incendiate, [m];

$\rho_0$  - densitate a aerului, [kg/m<sup>3</sup>];

$\gamma$  - distanța de la podea până la partea inferioară a stratului de fum acumulat la tavan, [m];

$g$  - accelerația gravitațională, [m/s<sup>2</sup>];

$T_0$  - temperatura aerului ambiant, [K];

$T$  - temperatura gazelor de ardere, [K].

Pentru valorile uzuale:  $\rho_o = 1,22 \text{ kg/m}^3$ ;

$$T_o = 190 \text{ K și } T = 1100 \text{ K.}$$

se obține:  $M = 0,188 * P * \gamma^{3/2} \text{ [kg/s]}$

Plecând de la premiza că înălțimea stratului de aer de pe căile de evacuare „y” nu trebuie să scadă sub o anumită valoare, formula de mai sus permite calculul volumului de gaze de ardere necesar a fi evacuat. Admițând pentru y valoarea de 2 m se obține:

$$M = 0,188 P * 2^{3/2} = 0,53 P \text{ [kg/s]}$$

și volumul necesar a fi extras este:

$$V_s = 0,53 P / \rho_s$$

$\rho_s$  reprezintă densitate a gazelor la nivelul deschiderii.

Estimarea lungimii flăcării în zona incendiată se poate face cu relația, determinată experimental:

$$H_f = 0,011 (KQ)^{0,4} \text{ [m]} \quad (3.18)$$

în care:  $H_f$  - înălțimea flăcării, [m];

Q - fluxul de căldură degajat în procesul de ardere, [W];

K - factor de perete [-];

K = 1 - arderea nu este situată în apropierea pereților încăperii;

K = 2 - arderea are loc lângă perete;

K = 4 - arderea are loc la colțul încăperii.

Estimarea temperaturii gazelor de ardere deasupra focarului se poate face cu relația determinată experimental:

$$\Delta T = \frac{0,222(KQ)^{2/3}}{H^{5/3}}, \text{ [K]} \quad (3.19)$$

în care:  $\Delta T$  - creșterea temperaturii față de temperatura ambiantă, [K];

Q - fluxul de căldură degajat în procesul de ardere, [W];

H - înălțimea față de suprafața de ardere, [m];

K - factor de perete, [-].

Estimarea duratei de timp necesare umplerii cu fum a volumului încăperii incendiate se poate face cu relația, determinată experimental:

$$t = 200A \frac{\left(\frac{h-d}{d}\right)^{5/2}}{Q^{5/6}} \quad (3.20)$$

în care: t - timpul, [s];

A - aria podelei încăperii, [m<sup>2</sup>];

Q - fluxul de căldură degajat în procesul de ardere, [W];

h - distanța de la suprafața de ardere la tavan, [m];

d - distanța de la suprafața de ardere până la nivelul la care se efectuează calculul, [m].

### 3.4. Modele fizico-matematice privind arderea materialelor combustibile solide, în incinte ventilate și neventilate

Dat fiind caracterul aleatoriu al incendiilor reale, din studiile experimentale, pe modele, la scară reală sau redusă, pe focare tip, în cuptoare sau în încăperi speciale, nu pot fi formulate legi generale precise asupra rezistenței la foc a structurilor și elementelor de construcții. Acest lucru se poate realiza prin metoda similitudinii, cu ajutorul unor criterii adimensionale, astfel pot fi elaborate/dezvoltate modele computerizate, care să reproducă inițierea și evoluția incendiilor.

Momentan cercetarea incendiilor (fenomenul de incendiu – arderea materialelor combustibile solide în interiorul incintelor) se dezvoltă în strânsă legătură cu dezvoltarea informaticii, ceea ce conduce la elaborarea de noi modele complexe ce pot fi rulate doar pe calculator.

Două mari clase se disting pentru modelele de incendii și anume:

- **Modele fizice**

Modelele fizice încearcă să reproducă fenomenul de incendiu într-o situație fizică simplificată.

Dintre acestea, modelele la scară redusă sunt o formă foarte răspândită de modelare având în vedere că experimentele la scară reală sunt costisitoare, dificile și, uneori, total imposibile. Deseori, prin studierea comportării la foc la o scară redusă se poate realiza înțelegerea fenomenelor.

*Scopul modelelor fizice este de a descoperi legile care guvernează comportarea sistemelor fizico-chimice.*

- **Modele matematice**

Modelele matematice constau în seturi de ecuații care descriu comportarea unui sistem fizic.

Modelul matematic rezultat poate fi utilizat ulterior pentru a anticipa comportarea sistemelor fizice reale. Din acest motiv, modelele fizice și cele matematice se întrepătrund și sunt complementare.

Modelele fizico matematice ale procesului de ardere a materialelor combustibile solide abordează cu precădere pentru fenomenul de incendiu, cu cel trei faze ale sale. Altfel spus, se consideră că un incendiu convențional produs într-un spațiu închis evoluează după cele trei faze:

- ✓ faza de dezvoltare;
- ✓ faza de ardere activă;
- ✓ faza de regresie.

#### 3.4.1. Modele matematice privind arderea în incinte ventilate și neventilate

##### Faza de dezvoltare a arderii

Această fază este caracterizată de apariția fenomenului de **flash-over**, fenomen ce apare atunci când aerul necesar arderii este în cantitate suficientă.

Cel mai important parametru al fazei de dezvoltare a arderii / incendiului este **viteza de ardere** exprimată sub forma de flux de căldură degajat, flux, care practic nu poate fi calculat. Fluxul efectiv de căldură la suprafața materialului nu poate fi determinat precis, fiind influențat de absorbția unei părți

din radiația flăcării de către stratul de vapori emiși, iar pe de altă parte căldura latentă de vaporizare nu este determinată pentru materialele uzuale, proprietățile termo-fizice fiind dependente de temperatură.

Fenomenul de flash-over este caracterizat și prin *creșterea rapidă, exponențială a temperaturii* și printr-o *masivă și rapidă generare de fum*, mai ales când finisajul pereților este combustibil.

Dacă în situația de regresie a arderii / incendiului, are loc o admisie bruscă de aer proaspăt (prin spargerea geamului, deschiderea ușii, spărturi *sub* planul neutru ș.a.), se produce fenomenul de **backdraft** (termen intraductibil), care are manifestări similare celui de flash-over: creșterea bruscă a suprafețelor în combustie, în întreaga incintă, cu reducerea procentului de oxigen și creșterea celui de oxid de carbon, creșterea rapidă a temperaturii, masiva generare de fum.

Faza de dezvoltare a arderii, incendiul este însoțit de *o multitudine de procese fizice complexe*. Se analizează dezvoltarea arderii / incendiului care constă în determinarea factorilor principali care influențează mecanismul de propagare, precum și în descrierea dezvoltării sale cu ajutorul *parametrilor termodinamici mediați după volumul incintei*.

Parametrii termo-dinamici utilizați în analiza dezvoltării arderii se determina cu următoarele relații:

- starea mediului gazos care ocupă în totalitate incinta de volum  $V$  este caracterizată de următoarele mărimi:

$$\rho_m = \frac{1}{V} \int_V \rho \cdot dV, [\text{kg/m}^3] \quad (3.21)$$

$$\rho_{i,m} = \frac{1}{V} \int_V \rho_i \cdot dV, [\text{kg/m}^3] \quad (3.22)$$

$$P_m = \frac{1}{V} \int_V P dV, [\text{Pa}] \quad (3.23)$$

în care:

$\rho, \rho_i, p$  - valorile locale ale densității mediului gazos, densității componentei „i”- a mediului gazos, presiunea mediului gazos;

$\rho_m, \rho_{i,m}, P_m$  - valorile medii ale densității și presiunii mediului gazos,  $[\text{kg/m}^3]$ .

$$X_i = \frac{\rho_{i,m}}{\rho_m} - \text{raportul densităților, [-]}$$

Relația dintre valorile locale ale parametrilor sunt exprimate de ecuația generală a gazelor:

$$p = \rho \cdot R \cdot T \quad (3.24)$$

unde:

$T$  - temperatura locală,  $[\text{K}]$ .

Relația 3.24 scrisă pentru valorile medii ale parametrilor locali are următoare expresie:

$$p_m = \rho_m \cdot R_m \cdot T_m \quad (3.25)$$

unde:

- Temperatura medie a gazelor, determinată cu relația:

$$T_m = \left[ \frac{1}{V} \oint_V \left( \frac{P}{P_m} \right) \left( \frac{R_m}{R} \right) \frac{1}{T} dV \right]^{-1}, [\text{K}]$$

(3.26)

- constanta specifică medie a gazelor, determinată cu relația:

$$R_m = c_{pm} - c_{vm}, [\text{J/kg} \cdot \text{K}]; \quad (3.27)$$

- căldura specifică medie a gazelor la presiune constantă, se determină cu relația:

$$c_{pm} = \sum_1^z X_i C_{p,i}(T_m), [\text{J/kg} \cdot \text{K}]; \quad (3.28)$$

- căldura specifică medie a gazelor la volum constant, se determină cu relația

$$c_{vm} = \sum_1^z X_i C_{v,i}(T_m), [\text{J/kg} \cdot \text{K}]; \quad (3.29)$$

- $c_{p,i}$  și  $c_{v,i}$  reprezintă căldurile specifice la presiune constantă și la volum constant ale componentului „i” al mediului gazos, la temperatura  $T_m$ , [K];

Având în vedere volumul mic, uzual, al unei incinte incendiate, se poate considera că:

$$p/P_m \approx 1,$$

$$R/R_m \approx 1.$$

Ecuțiile care descriu modificarea parametrilor termodinamici se deduc din legile de conservare a masei și energiei.

Masa gazului se modifică în orice interval scurt de timp „dt” prin pătrunderea aerului proaspăt în cantitate  $G_a d\tau$  și prin formarea în urma arderii a unei cantități de volatili combustibile  $m d\tau$ , precum și prin ieșirea din incintă a unui debit de gaze de ardere  $G_g d\tau$ .

unde :

$G_a$  - debitul de aer pătruns în incintă, [kg/s];

$G_g$  - debitul de gaze de ardere evacuate din incintă, [kg/s];

$\dot{m}$  – debit masic de volatili combustibile, [kg/s].

Ecuția de bilanț scrisă pentru incintă este exprimată cu următoarea relație:

$$\frac{d}{dt}(\rho_m V) = G_a + \dot{m} + G_g \quad (3.30)$$

Ecuțiile care descriu modificarea concentrației medii volumetrice de oxigen  $X_o$ , azot  $X_N$  și gaze de ardere  $X_B$  sunt următoarele:

$$\frac{d}{dt}(X_o \rho_m V) = (X_o)_a G_a - n_o X_o G_g - \eta m L_o \quad (3.31)$$



Prin înlocuire în ecuația (3.30) rezulta :

$$\rho_m V \frac{dX_o}{dt} = G_a [(X_o)_a - X_o] - G_o X_o (n_o - 1) - m(\eta L_o + X_o) \quad (3.32)$$

$$\rho_m V \frac{dX_N}{dt} = G_a [(X_N)_a - X_N] - G_g X_N (n_N - 1) - m X_N \quad (3.33)$$

$$\rho_m V \frac{dX_B}{dt} = m(L_B - X_B) - X_B G_g (n_B - 1) - X_B G_a \quad (3.34)$$

unde:

$(X_o)_a$ : - concentrația oxigenului, [%];

$(X_N)_a$ , - concentrația azotului în aerul intrat, [%];

$L_o$  - cantitatea de oxigen teoretic necesară pentru arderea unității de masă a materialului combustibil, [kg];

$\eta$  - randamentul arderii, [-];

$n_o, n_N, n_B$  - coeficienți care țin seama de diferența de concentrație din gazele ieșite și valoarea medie volumetrică;

$L_B$  - cantitatea de produs de ardere care se formează la arderea unității de masă a combustibilului, [kg];

Aplicând Principiul I al termodinamicii rezultă relația:

$$\frac{dU}{dt} = \eta m H_c + c_{p,a} T_a G_a - \psi_g c_{p,m} T_m G_g - \alpha (T_m - T_s) A_i + q_p m \quad (3.35)$$

unde:

$H_c$  - căldura de ardere, [kJ/kg];

$T_a, c_{p,a}$  – temperatura, [K], respectiv căldura specifică a aerului care intră în încăperea, [J/(kg·K)];

$\alpha$  - coeficientul mediu transfer de căldură ce ține seama de transferul de căldură prin convecție și radiație, [W/(m<sup>2</sup>·K)], de la mediul gazos la suprafața interioară  $A_i, \alpha = f(T_m)$ ;

$T_s$  - temperatura suprafeței interioare, [K],  $T_s = f(\alpha, T_m)$ ;

$\psi_g$  - coeficient care ține seama de diferența dintre căldura specifică și temperatura gazelor ieșite față de valorile medii  $c_{p,m}, T_m$ ;

$q_p$  - cantitatea de căldură care intră cu unitatea de masă a produselor de sublimare și piroliză, [J/kg];

$$U \approx \frac{1}{K_m - 1} P_m V \text{ energia internă, [J]} \quad (3.36)$$

unde:

$k_m = c_{p,m} / c_{v,m}$  – reprezintă coeficientul adiabatic mediu;

$m = f(A_i)$  – reprezintă viteza specifică de ardere a combustibilului, care depinde de suprafața interioară ( $A_i$ ) de ardere / incendiu și care variază în timp.

Pentru simplificare se fac următoarele ipoteze pentru a determina factorii care influențează debitele de aer respectiv de gaze de ardere  $G_a$ ,  $G_g$  și anume:

$p_m$  - presiunea în incintă la distanța  $h$  de pardoseală, [Pa];

$p_a$  - presiunea în atmosfera înconjurătoare, [Pa];

$T_{m,o}$ ;  $p_{m,o}$  - temperatura respectiv presiunea gazului în incintă înainte de inițierea incendiului (sunt egale cu temperatura și respectiv presiunea atmosferică înconjurătoare  $T_a$ ,  $p_a$ ).

Presiunea în incintă în plan orizontal, raportată la marginea inferioară a deschiderii ( $p_1$ ) și presiunea în plan orizontal raportată la marginea exterioară, ( $p_2$ ), la distanța  $y$ , sunt date de relațiile:

$$p_1 = p_m - g \cdot \rho_m \cdot y, \text{ [Pa]} \quad (3.37)$$

$$p_2 = p_a - g \cdot \rho_a \cdot y, \text{ [Pa]} \quad (3.38)$$

Raportul densităților  $\rho_m$  și  $\rho_a$  se aproximează prin diferența raportul temperaturilor, conform relației:

$$\frac{\rho_m}{\rho_a} = \frac{T_{m,o}}{T_m} \quad (3.39)$$

Ca urmare, diferența de presiune dintre presiunea raportată la marginea inferioară și cea exterioară, poate fi calculată cu relația:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (p_m - p_a) + g \rho_a y \left( \frac{T_m - T_{m,o}}{T_m} \right), \text{ [Pa]} \quad (3.40)$$

Debitul masic de gaze evacuat din incintă (dacă  $\Delta p > 0$ ) în zona de înălțime  $dy$  aflată la distanța  $y$  de marginea de jos a golului, este dat de relația:

$$dG_g = b \cdot dy \left\{ 2 \rho_a \frac{T_{m,o}}{T_m} \left[ (p_m - p_a) + g \rho_a y \left( \frac{T_m - T_{m,o}}{T_m} \right) \right] \right\}^{1/2}, \text{ [Kg/s]} \quad (3.41)$$

Determinarea debitului masic complet de gaze  $G_g$  se obține prin integrarea relației de mai sus 3.41, între limitele valorilor  $y$  pentru care  $\Delta p > 0$ . Limita superioară de integrare este egală cu  $h_v$ , iar limita inferioară  $y^*$  se determină în fiecare moment al incendiului astfel:

a) dacă  $p_m - p_a \geq 0$  rezultă  $y^* = 0$

$$\text{b) dacă } p_m - p_a < 0 \quad \text{rezultă} \quad y^* = -\frac{T_m(p_m - p_a)}{g\rho_a(T_m - T_{m,o})}$$

Astfel prin integrare se obține :

a) pentru  $y^* = 0$

$$G_g = \frac{2}{3}b \sqrt{2\rho_o \frac{T_{m,o}}{T_m}} * \frac{T_m}{g\rho_a(T_m - T_{m,o})} * \left[ (p_m - p_a) + g\rho_a h_V * \left( \frac{T_m - T_{m,o}}{T_m} \right)^{3/2} - (P_m - P_a)^{3/2} \right] \quad (3.42)$$

b) pentru  $y^* > 0$

$$G_g = b \cdot \sqrt{2\rho_a \frac{T_{m,o}}{T_m}} * \frac{2T_m}{3g\rho_o(T_m - T_{m,o})} * \left[ (p_m - p_a) + g\rho_a h_V * \left( \frac{T_m - T_{m,o}}{T_m} \right)^{3/2} \right] \quad (3.43)$$

La valori  $p_m - p_a < 0$ , la înălțimi ale deschiderii mai mici decât  $y^*$ , va intra aer în incintă, cu debitul:

$$dG_a = b \cdot dy \left\{ -2\rho_a \left[ (p_m - p_a) + g\rho_a y^* \left( \frac{T_m - T_{m,o}}{T_m} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (3.44)$$

Sistemul de ecuații (3.25) – (3.44), împreună cu ecuațiile care descriu dependența coeficientului  $\alpha = f(T_m)$ ,  $m = f(A_i)$  și  $T_s = f(\alpha, T_m, c_i, \rho_i)$  descrie modul general de propagare a arderii / incendiului, în cursul fazei de dezvoltare.

Perioada de flash-over poate rezulta în urma unei creșteri mai rapide a fluxului de energie degajat, cu temperatura, față de fluxul pierderilor de căldură. Ipoteza cum că dezvoltarea arderii / incendiului este staționară este în general valabilă numai înainte de flash-over. Schimbări staționare pot duce la un salt de la o stare staționară la alta, flash-over putând fi considerat ca o discontinuitate în evoluția arderii / incendiului, în care factorul principal este fluxul de căldură radiat din stratul superior al incintei către combustibil.

Bilanțul energetic, simplificat, pentru o flacără ascendentă este descris de relația:

$$c_v \frac{d(mT)}{dt} = \dot{Q}_c(T, t) - \dot{Q}_p(T, t) \quad (3.45)$$

unde:

$m$  - masa gazelor combustibile în strat, [kg];

$c_v$  - căldura specifică la volum constant a gazelor din strat, [kJ/(kg\*k)];

$\dot{Q}_c, \dot{Q}_p$  - fluxul de căldură generat prin arderea combustibilului, flux de căldură pierdut, [W].

Fluxul pierderilor de căldură include căldura pierdută prin transport de masă, prin deschideri, prin radiație prin deschideri și prin suprafața interioară a incintei. Acesta este exprimat cu ajutorul relației:

$$\dot{Q}_p = (m_a + m_c) * c_v * (T - T_o) + k * A_i (T - T_o) \quad (3.46)$$

unde:

$m_a, m_c$  - debitul masic de aer respectiv combustibil, [kg/s];

$k$  - coeficient global de transfer de căldură, [W / (m<sup>2</sup>\*K)];

$A_i$  - aria suprafeței interioare, [m<sup>2</sup>];

$T_o$  - temperatura mediului ambiant, [K];

Fluxul de căldură degajat prin arderea combustibilului, poate fi descris cu ajutorul relației următoare:

$$\dot{Q}_c = (1 - \varphi) * m_{c,r} * H_c \quad (3.47)$$

unde:

$\varphi$  - fracția din energia totală degajată, emisă de flăcări, care nu intră în stratul superior, [-];

$H_c$  – entalpia combustibilului, [kJ/kg];

$m_{c,r}$  - debitul masic de combustibil ars în incintă, [kg/s].

Relația de calcul pentru debitul masic de volatile combustibile are expresia:

$$\dot{m} = \frac{A_c * \dot{Q}_E * (T)}{L_v} \quad (3.48)$$

unde:

$A_c$  - aria combustibilului, [m<sup>2</sup>];

$Q_E$  - fluxul de căldură transmis către suprafața combustibilului, [W/m<sup>2</sup>];

$L_v$  - căldura latentă de vaporizare, [kJ/kg].

$Q_E(T)$  - fluxul de căldură care ar fi produs într-o incintă cu temperatura stratului superior de gaz egală cu  $T$  și care depinde de mărimea incendiului, natura combustibilului, concentrația de particule de funingine din strat ș.a. Practic se poate considera  $Q_E(T)$  ca un flux radiant, componenta putând fi neglijată.

Debitul masic de aer care intră într-o incintă incendiată prin ușă sau fereastră poate fi exprimat prin relația:

$$\dot{m}_a = \frac{2}{3} K \cdot l \cdot \rho_o \cdot \sqrt{2g * \left(\frac{T_o}{T}\right) * \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) * (h_v - h_N)^3} - \dot{m}_c, \text{ [kg/s]} \quad (3.49)$$

unde:

$l, h_v$  - lățimea respectiv înălțimea deschiderilor, [m];

$K, g, \rho_0, T_0$  - parametri constanți, [-];

$h_N$  - înălțimea planului neutru, [m], în general  $h_N = \frac{h_V}{2}$ .

Se definesc urătoarele mărimi adimensionale:

$$\theta = \frac{T_m}{T_{m.o}}; \quad K_1 = \frac{c_{p,a} T_a (G_a + \Psi)}{\eta \cdot R \cdot \dot{Q}_c}; \quad K_2 = \frac{\alpha^* T_{m.o} A_i}{\eta \cdot R \cdot \dot{Q}_c};$$

$$K_3 = \frac{m c_{p,m} T_{m.o} (G_a + R)}{\eta \cdot R \cdot \dot{Q}_c}; \quad \tau^* = \frac{m K_m P_m V}{(K_m - 1) \eta \cdot R \cdot \dot{Q}_c};$$

$$\bar{t} = \frac{t}{t^*}; \quad \alpha^* = \alpha \frac{T_m - T_w}{T_m - T_{m.o}}$$

Introducând în expresia debitului masic de gaze de ardere evacuate din incintă relația 3.42, mărimile adimensionale definite mai sus, relația 3.42 devine:

$$\frac{d\theta}{dt} = \theta(1 + K_1 + K_2) - \theta^2(K_2 + K_3) \quad (3.50)$$

Ecuția (3.50) este o ecuație diferențială obișnuită de ordinul I cu variabile separabile și cu soluția de formă :

$$\theta = \frac{\theta^* t^{\tau^*}}{\theta^* - 1 + t^{\tau^*}} \quad (3.51)$$

unde:

$$t' = (1 + K_1 + K_2) \cdot t \quad \text{și} \quad \theta^* = \frac{1 + K_1 + K_2}{K_2 + K_3}$$

Condiția necesară ca două procese de propagare a incendiului în două incinte, geometric asemănătoare, de diferite dimensiuni, să fie asemănătoare, este să se respecte egalitatea temperaturilor medii volumetrică în momente analoge de timp:

$$\theta^N = \theta^M \quad \text{la} \quad \bar{t}^N = \bar{t}^M$$

Deoarece  $\theta = f(t, K_1, K_2, K_3)$ , rezultă:

$$K_1^N = K_1^M; \quad K_2^N = K_2^M; \quad K_3^N = K_3^M$$

unde:

$N$  - indicele ce se referă la experimentul la scară naturală,

$M$  - indicele ce se referă la experimentul pe modele reduse la scară.

Din aceste condiții inițiale rezultă următoarele concluzii:

- Dacă atât în incinta în mărime naturală, cât și în cea modelată ard aceleași materiale combustibile în condiții inițiale identice ( $Q_c^N = Q_c^M$ ;  $T_{m,o}^N = T_{m,o}^M$ ;  $T_a^N = T_a^M$ ;  $p_m^N = p_m^M$ ) atunci din condiția  $K_1^N = K_1^M$  rezultă:

$$\frac{G_a^N}{G_a^M} = \frac{R^N}{R^M} \quad (3.52)$$

și din condiția:  $K_2^N = K_2^M$  rezultă:

$$\frac{A_i^N}{A_i^M} = \frac{R^N}{R^M} \quad (3.53)$$

Ca urmare, dacă dimensiunile liniare ale modelului sunt de 4 ori mai mici decât dimensiunile incintei în mărime naturală, adică  $\frac{l^N}{l^M} = 4$ , atunci consumul de material combustibil trebuie să fie în model de  $4^2$  ori mai mic, iar cantitatea de aer care intră în incinta model este și ea mai mică de 4 ori.

- pentru duratele de timp analog se obține:  $t^M = \frac{t^N}{4}$  (3.54)

Deci duratele asemănătoare de timp, calculate în secunde de la începutul proceselor, în incinta la mărime naturală și cea modelată, diferă de 4 ori.

Datorită faptului că apar fenomene diferite în funcție de scară, nu este în general posibilă studiarea situațiilor complexe dintr-un incendiu, la scară mică.

### Faza de Ardere Activă.

Această fază de ardere activă este denumită și faza de ardere / incendiu generalizat.

*Regimul de ardere stabilizat* instalat după producerea flash-over poate fi condiționat fie de suprafața materialelor combustibile, fie de dimensiunile deschiderilor, deci de regimul admisiei aerului.

Atunci când *procesele de ardere sunt ventilate*, intens și de durată mică, viteza de ardere este limitată de mărimea ariei suprafeței combustibilului, când aerul circulă în exces, în raport cu suprafața de contact dintre combustibil și aer.

În cazul *proceselor de ardere neventilate*, când cantitatea de aer din incintă este mai mică decât valoarea critică necesară combustiei, viteza de ardere depinde de dimensiunile deschiderilor de ventilație din incintă. Cu cât aceste dimensiuni sunt mai mari, cu atât arderea va fi mai rapidă.

În literatura de specialitate este exprimată *dependența vitezei de ardere funcție de factorul de ventilație* -  $F_v$ , stabilită experimental și definit prin relația de mai jos:

$$F_v = A_v \sqrt{h_v}, [m^{5/2}] \quad (3.55)$$

unde:

$A_v$  - aria deschiderilor de ventilație,  $[m^2]$ ;  
 $h_v$  - înălțimea deschiderii,  $[m]$ .

Temperatura gazului în incintă depinde de proprietățile termo-dinamice ale mediului gazos și de factorul de deschidere  $F_o$ :

$$F_o = \frac{A_v * \sqrt{h_v}}{A_T}, \quad [m^{1/2}] \quad (3.56)$$

Pentru un incendiu generalizat, viteza de ardere a fost determinată în condițiile restrictive ale arderii unor focare din lemn, la valori diferite ale mărimii deschiderilor de ventilație, încercări efectuate atât la mărime naturală, cât și la scară. Astfel s-a determinat dependența vitezei de ardere (debit masic de volatile combustibile) de mărimea și forma deschiderilor de ventilație prin relația, cunoscută ca relația lui Kawagoe:

$$\dot{m} \approx 5,5 A_v \sqrt{h_v}, \quad [Kg/min] \quad (3.57)$$

în care:

$A_v$  și  $h_v$  sunt aria [ $m^2$ ] și înălțimea [ $m$ ] deschiderii de ventilație.

Factorul de ventilație  $A_v * \sqrt{h_v}$  a fost dedus semiempiric în următoarele ipoteze:

- proprietățile fizice ale gazelor din compartiment sunt uniforme în tot volumul (justificat din punct de vedere fizic deoarece după flash-over dispare gradientul de temperatură);
- nu există mișcare ascensională în interiorul compartimentului ;
- gazele fierbinți părăsesc incinta deasupra planului neutru, în timp ce aerul rece intră sub acesta;
- nu există interacțiuni între fluxurile de gaze care intră și ies din compartiment.

În **regimul controlat de ventilație**, viteza de ardere este proporțională cu factorul de ventilație  $F_v$ , dar numai pentru lemn.

Deoarece:

$$m = 5,5 * A_v * \sqrt{h_v} \quad (kg/min) = 0,09 * A_v * \sqrt{h_v} \quad (kg/s) \quad (3.58)$$

se poate scrie :

$$Q_c = 0,09 * A_v * \sqrt{h_v} * H_c, \quad [W] \quad (3.59)$$

$Q_c$  - fluxul de căldură generat de sursă / fluxul de căldură degajat prin ardere, [ $W$ ].

### Faza de Regresie .

În cursul fazei de regresie , temperatura încetează să mai crească, apoi începe să scadă, datorită epuizării combustibilului. Când sarcina termică începe să se epuizeze, viteza de ardere începe să scadă. De regulă, se consideră că perioada de regresie tipică începe după ce 80% din combustibil a ars.

Flăcările se atenuază mult, după care dispar, fiind înlocuite treptat de jar și cenușă. Odată cu reducerea dimensiunilor flăcării, reapare mediul gazos între flacăra și elementele de construcții.

Această perioadă este considerată ca o directă continuare a incendiului generalizat controlat de ventilație și de aceea se aplică aceleași modele și relații de calcul.

Importanța acestei perioade nu trebuie subestimată din punct de vedere al măsurilor de siguranță. Temperatura scade, dar nu brusc, staționând mult timp la valoare foarte ridicată. Uneori chiar în această fază incendiul se transmite clădirilor sau încăperilor vecine.

În cazul modelării fizice este dificil de redus la scară, în același timp, fenomenele de convecție și radiație. Mărimea suprafeței având un rol determinant în interacțiuni specifice, atât în cazul radiației, cât și al convecției, reducerea la scară nu mai acoperă varietatea parametrilor ce intervin. De aceea modelarea Froude nu poate fi aplicată la toate problemele ridicate de studiul unui incendiu, cum ar fi cele la care radiația joacă un rol important.

De asemenea, în aprinderea materialelor prin radiație sunt anumite efecte secundare, asociate cu scara, care se datorează schimbărilor în distribuția temperaturii și concentrației volatilor în zona flăcării, deoarece mărimea suprafeței radiate se schimbă.

Modelarea fizică nu implică întotdeauna o reducere majoră la scară fizică. Se caută să se izoleze, să se controleze și să se studieze parametrii cei mai importanți care pot permite extrapolări care să conducă la o anumită înțelegere a mecanismelor intrinseci fenomenului studiat.

Astfel, prin testarea într-un cuptor în care creșterea temperaturii are loc după o curbă standard, a unor elemente de structură ale unei clădiri, se urmărește modelarea comportării la foc în vederea determinării structurii clădirii în cazul unui incendiu.

### 3.4.2. Modele fizice privind procesele de ardere în incinte ventilate și neventilate

Cercetări privind modelarea incendiilor au început după al doilea război mondial, îndeosebi în Japonia, pe baza unor teste de mărime naturală, în clădiri ce urmau să fie dezafectate. Scopurile urmărite au fost: propagarea incendiilor în compartimente și în clădiri, propagarea fumului în clădiri și pe coridoare, flashover în incinte cu și fără finisaj combustibil, propagarea focului de-a lungul plafonului combustibil în birouri, efectele incendiului asupra structurii de rezistență, detectarea incendiilor, compoziția gazelor din fum, ș.a.

Pe baza datelor experimentale acumulate, au fost elaborate modele, apreciate ca fiind de bază în literatura de specialitate (Kunio Kawagoe, Saito Fumikaru, I. YKoi, T. Sekine, ș.a.) care au impus relația considerată fundamentală pentru viteza de ardere într-un incendiu:

$$m = 5,5 A_v \sqrt{h_v} \quad [\text{kg} / \text{min.}] \quad (3.60)$$

în care:

$A_v$  - aria deschiderii, [m<sup>2</sup>];

$h_v$  - înălțimea deschiderii, [m].

Începând cu anii 1970, datorită ecologiștilor, testele de mărime naturală sunt oprite de către Building Research Institute - TKio.

În același timp, în occident, comitetul pentru incendii W.14 al C.I.B. (Conseil International du Batiment) a inițiat două programe de experimentare la care au participat laboratoare din 9 țări



vesteuropene (inclusiv S.U.A. și Canada) și în care s-au efectuat teste la scară utilizând focare din lemn, variind anumiți parametri, așa cum sunt prezentați în cele ce urmează:

• forma încăperii de testare:	1 x 2 x 1 m	2 x 1 x 1 m (h x L x l)
• poziția focarului:	colț	central
• tip focar:	1 focar mare	21 focare mici
• înălțimea stratului de combustibil:	160 mm	320 mm
• suprafața specifică:	20 mm	60 mm
• deschidere ventilație:	totală	sfert
• finisaj:	incombustibil	combustibil
• suprafața de aprindere:	16 cm <sup>2</sup>	144 cm <sup>2</sup> .

Au fost luați în considerare parametri caracteristici aerului ambiant în interiorul incintei, cum ar fi:

- umiditatea;
- temperatura mediului ambiant;
- deschideri multiple de ventilație – numărul de schimburi de aer;
- tipuri diferite de combustibil;
- efectul ignifugării.

Pentru fiecare experiment trebuie înregistrați următorii parametri:

- $\tau_f$  - timpul după care flăcările ating plafonul, [s];
- $\tau_2$  - timpul până când are loc trecerea de la o viteză mică la o viteză mare de propagare pe suprafața focarului, [s];
- $\tau_3$  - timpul la care are loc flash-over (propagarea pe întreaga suprafață a combustibilului), [s].

Au fost studiate:

- incendiile generalizate, măsurând viteza pierderii de masă, temperatura fluxul radiant;
- dezvoltarea incendiului din faza incipientă a incendiului, propagarea incendiului și influența mărimii deschiderilor de ventilație, a mărimii, distribuției și poziției focarelor de combustibil.

Variațiile între rezultatele laboratoarelor au fost mult mai mari decât se preconiza: viteza de propagare determinată a avut variații mai mari de 30%. S-a considerat că diferențele se datorează variabilității în tehnica măsurării sau raportării, în tehnică experimentală, în proprietățile lemnului și a materialelor din structura incintei experimentale.

Au fost evidențiate efectele variației cantității de combustibil și a scării experimentului, dar nu au putut fi incluse într-o teorie coerentă. Astfel s-a constatat, de exemplu, că înălțimea flăcării crește mai puțin decât valoarea teoretică ce rezulta din scara cu care crește înălțimea focarului de combustibil, iar timpul după care flăcările ating plafonul este mai mare pentru o scară mai mare, chiar dacă căldura de ardere crește proporțional cu scara.

Datorită complexității deosebite a fenomenului și a numărului mare de parametri implicați este practic imposibil să se asigure similitudinea tuturor grupurilor dimensionale care intervin în experimentele la scară. Regulile de reducere la scară necesare menținerii similitudinii pot fi

determinate din analizele dimensionale sau din ecuațiile fundamentale ce descriu fenomenul fizico-chimic, pentru fiecare fază în parte.

H.W. Emmons a stabilit, pe baza unei analize dimensionale, o funcție pentru fenomenul de ardere în timpul incendiilor de lichide, în care intervin 12 criterii de similitudine (Froude, Reynolds, Grashof, Prandtl, Schmidt, Damkoeler ș.a.), ajungând la ecuația simplificată (după neglijarea unor criterii datorită slabei lor influențe în cursul incendiului):

$$Fr = f\left(Gr, B, \frac{\varepsilon \cdot \sigma \cdot q^3 \cdot l}{c_p^3 \lambda}, Re_{vânt}\right), [-] \quad (3.61)$$

în care :

B - raportul dintre valoarea căldurii unității de masa a aerului și căldurii de evaporare a unității de combustibil, ;

$\varepsilon$  - factorul energetic de emisie al suprafeței, [-];

$\sigma$  - constanta Stefan - Boltzman, [W/(m<sup>2</sup>\*K<sup>4</sup>)];

q - căldura de reacție pe unitate de măsură, [kJ/kg];

l - lungimea caracteristică, [m];

$\lambda$  - conductivitatea termică, [W/(m\*K)].

Spalding a demonstrat în anul 1963 că este practic imposibil să fie menținute în totalitate condițiile de similitudine diferite, în timpul proceselor de ardere, astfel încât nu se poate atinge scopul decât examinând temeinic care sunt condițiile de similitudine care ar putea fi neglijate în timpul procesului supus analizei ( așa numita modelare parțială ).

Cele mai cunoscute metode de reducere la scară a modelelor fizice la incendii sunt „modelarea Froude” și „modelarea după presiune (Grashof)”.

Criteriul Froude :  $Fr = \frac{w^2}{gl}$  [-] se utilizează în situațiile în care forțele de vâscozitate pot fi neglijate, iar vitezele pot fi reduse la scară proporțional cu rădăcina pătrată a principalei dimensiunii  $\frac{w}{\sqrt{l}} = ct$ .

Din analiza dimensională rezultă că viteza este proporțională cu fluxul de căldura degajat  $Q_c^{1/5}$ . Ca urmare, în modelarea Froude, geometria trebuie menținută și cantitatea de căldura produsă trebuie redusă la scară astfel ca raportul  $\frac{Q_c^2}{l^5} = ct$ .

Criteriul Froude mai poate fi utilizat și sub forma :

$$Fr = \left( \frac{Q_c}{\rho_{ref} c_p T_{ref} l^{5/2} g^{1/2}} \right)^2 \frac{\left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^2}{\left( \frac{T}{T_{ref}} - 1 \right)^3}, [-] \quad (3.62)$$

În acest caz se variază căldura degajată  $Q_c$  dar se mențin constante debitul de aer și debitul de volatile combustibile.

Această modelare este utilizată în studiul curgerii fluidelor (fum, gaze de ardere) sub tavane, a corelației între înălțimea flăcării și temperatura plafonului pentru un incendiu de sol sau între înălțimea flăcării și temperatura în zona flăcării.

Limitări ale acestui tip de modelare apar când efectele vâscozității devin importante și când se modelează procesele tranzitorii asociate propagării flăcării, deoarece timpii de răspuns asociați cu încălzirea tranzitorie a solidelor urmează legi diferite.

Modelarea după presiune utilizează criteriul Grashof:  $Gr = \frac{gl^3}{\nu^2} \beta \Delta t$  [-].

Se crește presiunea până când viteza de ardere va fi:  $\frac{m_c l}{\mu} = f(Gr)$  [-].

Modelarea se utilizează pentru situația în care radiația flăcărilor către combustibil este mult mai mică decât transferul de căldură prin convecție - faza arderii lente.

### 3.5. Rezultate experimentale din literatura, privind procesele de ardere din incinte ventilate si neventilate

În prezentul capitol al tezei este prezentat un model experimental, care urmărește variația temperaturilor pe înălțime, într-o incintă ventilată.

Temperaturile ridicate ale gazelor într-o încăpere / clădire în flăcări, reprezintă un parametru important ce trebuie luat în calcul. Aceste temperaturi pot fi calculate cu formule empirice de la punctul 3.4.1. sau cu ajutorul unor modele disponibile în literatura de specialitate. Majoritatea acestor modele au fost concepute pentru cazul proceselor de ardere / incendiilor declanșate în încăperi / clădiri cu ventilare naturală, ceea ce le reduce aplicabilitatea în cazul încăperilor / clădirilor caracterizate prin ventilare forțată. Debitul de ventilare depinde de destinația încăperii / clădirii și de suprafața ocupată.

De obicei, cu cât este mai mică suprafața de ocupat, cu atât este mai mare debitul de ventilare. De exemplu în clădiri de birouri extinse pe suprafață mare, debitul de ventilare poate fi de circa 10 schimburi / oră, în timp ce în încăperi mai mici (cum ar fi un grup sanitar), debitul de aer de ventilat poate să atingă valoarea de 50 schimburi / oră.

Din punct de vedere al distribuției de temperaturi, aceasta este extrem de diferită în cazul unui incendiu declanșat într-un spațiu cu ventilare forțată, în raport cu cazul unui spațiu cu ventilare naturală. De exemplu: într-un spațiu cu ventilare forțată, stratificarea termică a aerului produsă de foc devine instabilă. De aceea estimarea parametrilor care caracterizează incendiul în interiorul acestui tip de clădire, pe baza teoriilor elaborate pentru incendii în spații cu ventilare naturală, nu este recomandată.

Temperatura maximă a gazului este subestimată de aceste modele (E.G Mitler 1984), care neglijează efectul ventilației.

Studiul efectului pe care îl are debitul de ventilare asupra modificărilor de parametri care caracterizează procesul de ardere (focul), este de aceea important în sensul ca oferă date care pot fi de folos proiectării sistemelor de stingere a incendiilor.

Mediul caracteristic unui incendiu în interiorul unui spațiu cu ventilare forțată poate fi simulat, utilizând un model simplu de estimare a temperaturii medii a gazelor fierbinți.

Problema care se pune este aceea de a evalua un model simplu printr-un studiu experimental, într-o incintă cu ventilare forțată. Materialele ce pot fi studiate sunt: lemn, polietimetil-metacrilat (PMMA) și metanol. Se studiază pentru început comportarea lemnului, ulterior dorindu-se studii și pe celelalte două materiale.

Standul de testare în acest scop trebuie să fie o camera de testare la foc, cu exhaustoare, având dimensiuni similare cu cele ale unui birou dintr-o clădire comercială.

Sunt studiate fenomene de ardere / incendii cu o putere termică mai mică de 40kW și cu temperaturi ale gazelor fierbinți de până la 50°C. Dorindu-se să se realizeze teste și la temperaturi ridicate.

### 3.5.1. Standul experimental pentru testarea la foc

Camera de testare la foc analizată are următoarele dimensiuni geometrice: Lungime  $L = 4$  m; lățime  $l = 3$  m; înălțime  $H = 2.8$  m și este prezentată schematic în figura de mai jos.

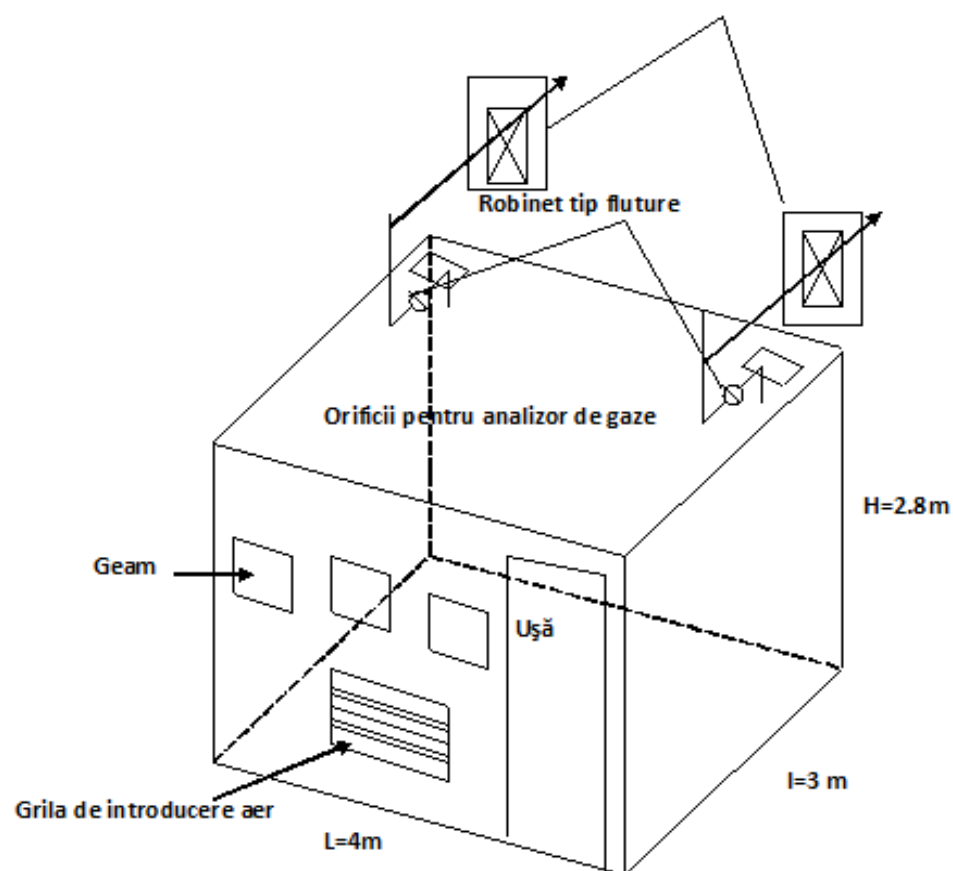


Figura 3.13. Schema camerei de testare la foc.

Secțiunea de intrare a aerului, având următoarele dimensiuni (l x H): 0.52m lățime și 0.4 m înălțime. Camera este prevăzută cu 6 orificii dreptunghiulare, având fiecare suprafața de 0.017 m<sup>2</sup>, rezulta ca factorul de ventilare calculat cu relația  $F_v = A\sqrt{H}$ , are valoarea de 0.18 m<sup>5/2</sup>.

unde:

A = suprafața și H = înălțimea deschiderii al fiecărui orificiu este de 0.003 m<sup>5/2</sup>, respectiv 0.017 m<sup>2</sup> \* 0.0034 m<sup>1/2</sup>, iar factorul total de ventilare corespunzător întregii secțiuni este de 0.18 m<sup>5/2</sup>.

Gazele fierbinți sunt evacuate din camera de testare cu ajutorul a doua ventilatoare axiale, racordate la o conductă de aer, cu secțiunea transversală de 0.09 m<sup>2</sup>. În amonte de ventilatoarele axiale trebuie montate robinete tip fluture, care permit reglajul debitului aerului de evacuat.

### 3.5.2. Echiparea camerei și amplasarea punctelor de măsura pentru temperaturi.

Pentru măsurarea temperaturilor, camera a fost echipată cu termocuple de tip K (Cr-Al), cu domeniul de măsurare între (0÷1200)°C, cu precizia ±0.5°C

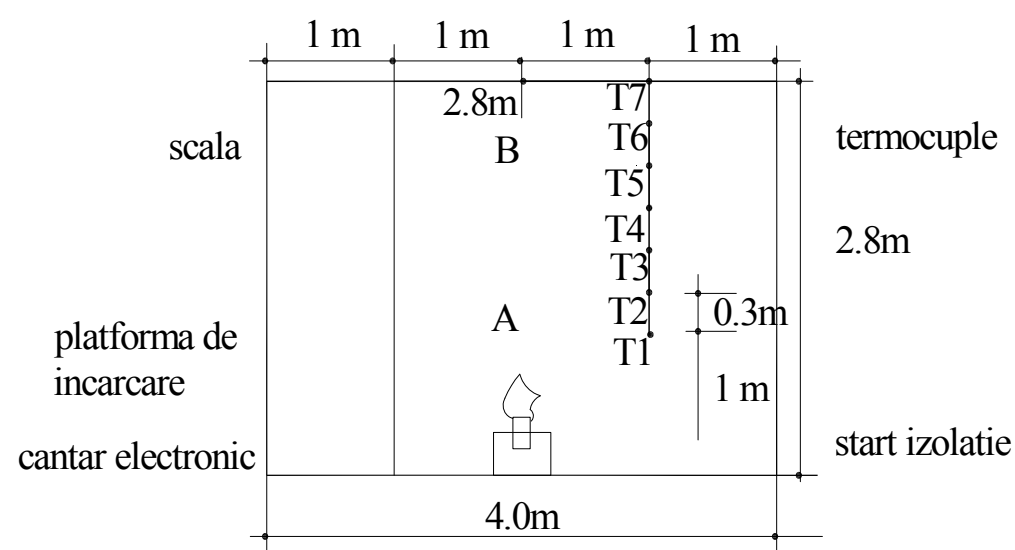


Figura 3.14. Amplasarea punctelor de măsură a temperaturii.

Pe înălțimea camerei, în partea dreapta în secțiunea A, sunt montate 7 termocuple (T<sub>1</sub> – T<sub>7</sub>), la distanțe egale de 300 mm. Un alt termocuplu T<sub>8</sub> este plasat în centrul camerei, în secțiunea B, deasupra platformei pe care se așează combustibilul, în scopul măsurării temperaturii gazelor fierbinți. Toate termocuplele sunt conectate la un sistem de achiziție de date aflat în afara încăperii.

### 3.5.3. Rezultate experimentale privind arderea lemnului în camera ventilată și neventilată

Pentru studiul experimental a fost ales lemnul pentru care au fost efectuate o serie de teste, pe parcursul cărora debitul de gaz evacuat este de maximum 60 schimburi/oră (556 L/s). Testele au fost efectuate cu debite de gaze evacuate cuprinse între 0 și 2001.60 (m<sup>3</sup>/h), corespunzătoare unor schimburi orare de aer cuprinse între 0 și 60, așa cum poate fi observat în tabelul 3.3.

Tabelul 3.3. Debitul de gaz evacuat pentru schimburi orare de aer cuprinse între 0 și 60.

Nr. crt	Combustibil	Debitul de gaz evacuat		
		[l/s]	[m <sup>3</sup> /h]	Schimburi de aer pe ora -ACH
1	Lemn	0	0	0
2	Lemn	93	334.8	10
3	Lemn	185	666	20
4	Lemn	287	1033.2	30
5	Lemn	371	1335.6	40
6	Lemn	464	1670.4	50
7	Lemn	556	2001.6	60

Dimensiunile probei testate sunt de: 310x310x100 mm, iar pentru inițierea arderii proba a fost îmbibată cu 30 g de metanol.

Fluxul de căldură degajat prin arderea probei se calculează cu relația 3.47 punctul 3.4.1., unde pentru căldura de combustie a lemnului s-a luat valoare 12,83 kJ/Kg.

Valorile obținute prin arderea probelor din lemn la diferitele schimburi orare de aer, sunt prezentate grafic în figura 3.15.

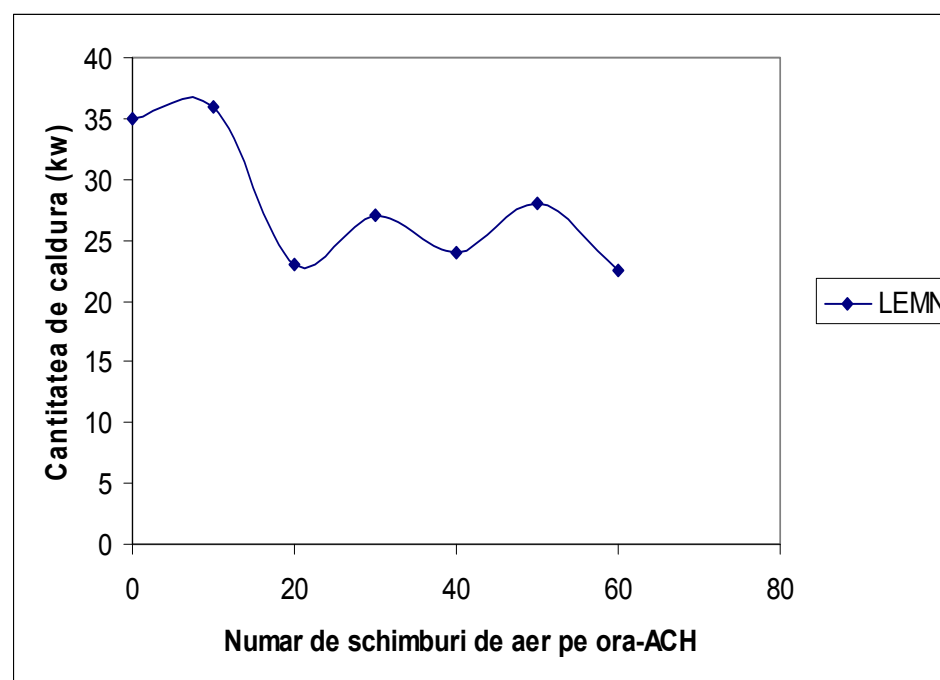


Figura 3.15. Variația fluxului de căldură degajat în funcție de numărul de schimburi orare de aer, cu valori măsurate.

Din figura 3.15. se poate observa că fluxul de căldură degajat prin arderea probelor din lemn, are o valoare maximă pentru un număr de 10 schimburi orare de aer. Fluxul de căldură degajat pentru schimburi orare de aer cuprinse între 20 și 60 variază între 23 și 27 kW.

Valorile temperaturilor măsurate pe verticală, în cele 7 puncte prezentate la punctul 3.5.2., la intervale de 60 s, sunt cuprinse în tabelul de mai jos:

Tabel 3.4. Valorile temperaturilor măsurate pe verticală

Înălțime H [m]	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8
Temp. [°C] (min 0)	18	18	18	18	18	18	18
Temp. [°C] (min 1)	18,5	19	18,5	18	20	25,5	32
Temp. [°C] (min 2)	20	27,5	30	34	36	38	40
Temp. [°C] (min 3)	27,5	31	36	37,5	38	39	44
Temp. [°C] (min 4)	30	36,5	41	44	45,5	41,5	50
Temp. [°C] (min 5)	35	40	45	48	49	50	57
Temp. [°C] (min 6)	35	43	45,5	50	51	52,5	59
Temp. [°C] (min 7)	38	46,5	49,5	51,5	54	55,5	61,5

Din tabel se observă că valorile temperaturilor cresc pe înălțime. Pentru același punct valorile temperaturilor cresc în timp. Sensul fizic exprimat de aceste valori este unul credibil, susținut de faptul că pe măsură ce lemnul arde, căldura degajată conduce la creșterea temperaturii gazelor de ardere.

Variația temperaturilor pe înălțime, în cazul arderii lemnului, pentru un debit de aer evacuat de 30 schimburi/ora, este ilustrată grafic în figura 3.16.

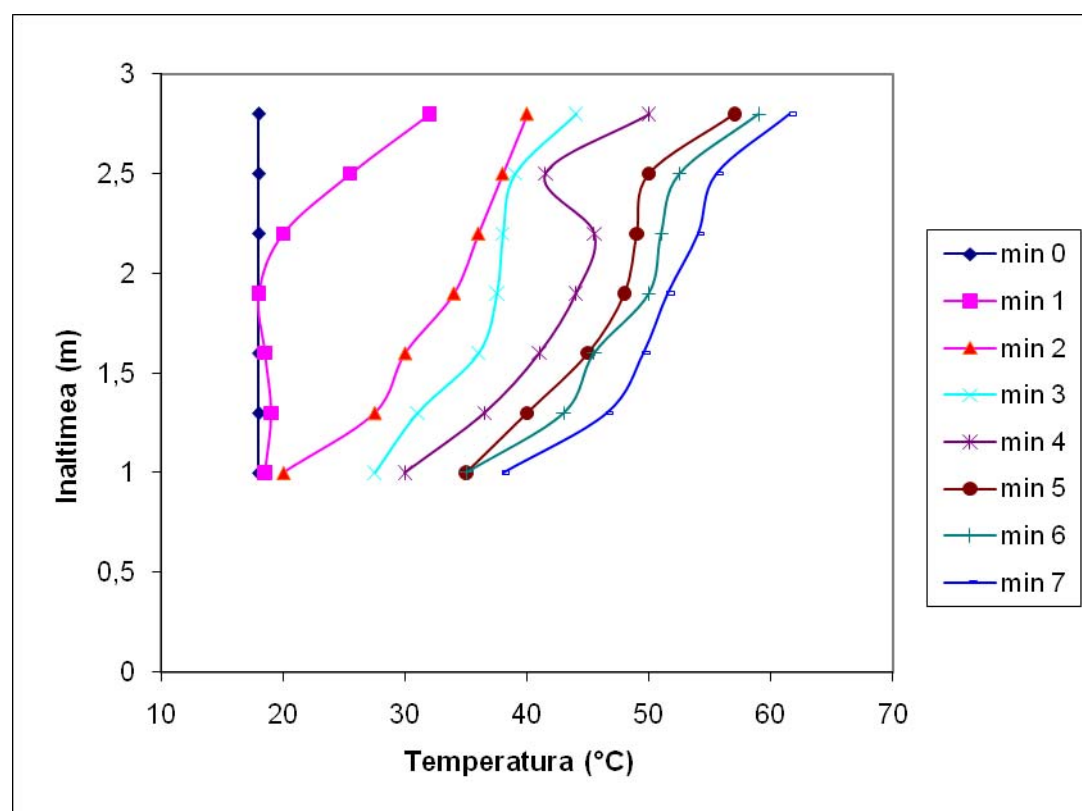


Figura 3.16. Distribuția temperaturilor pe verticală, pentru lemn și un debit de aer evacuat de 30 de schimburi orare, cu valori măsurate.

Studiul experimental s-a efectuat în aceeași incintă și pentru situația arderii lemnului în condițiile neventilării acesteia. Și în acest caz s-au urmărit variația temperaturii pe verticală a gazelor de ardere. În tabelul 3.5. sunt prezentate valorile temperaturilor pentru situația neventilării (pentru debite de aer de 0 – natural), și respectiv ventilării la 30 și 60 schimburi orare de aer.

Tabel 3.5. Variația temperaturii pe verticală.

Înălțime H [m]	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8
Natural 5 min.	37	41	43	46	49	55	60
ACH 30	38	46,5	49,5	51,5	54	55,5	61,5
ACH 60	53	62,5	70	75	79	80	93,5

Din tabelul 3.5. se observă că pentru cazul neventilării valorile temperaturilor pe înălțimea camerei sunt mai mici decât cele corespunzătoare cazului ventilării. Există însă diferențe maxime între cazul neventilării și ventilării cu 60 schimburi orare de aer. Acest lucru poate fi explicat de stratificarea termică care apare în cazul debitelor mari de aer. Variația temperaturilor pe înălțimea camerei este ilustrat grafic în figura 3.17.

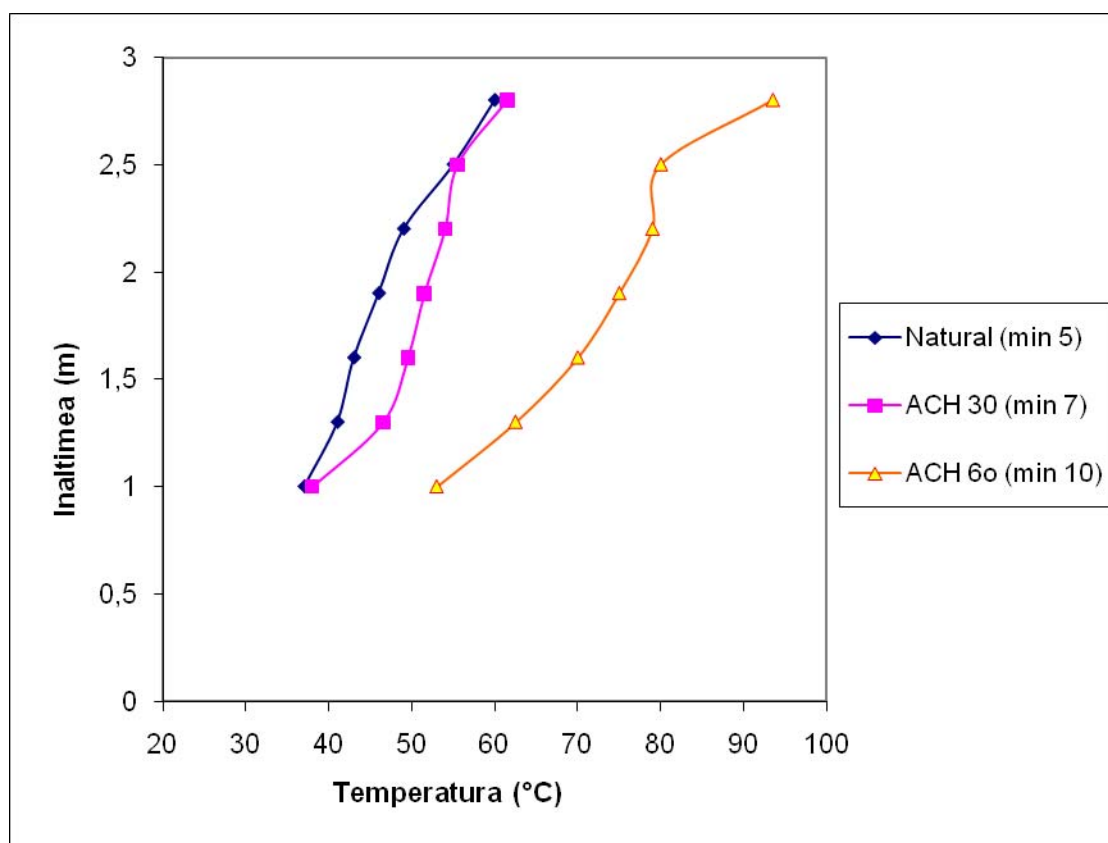


Figura 3.17. Distribuția temperaturii pe verticală la arderea stabilizată a lemnului, determinate experimental.



### 3.5.4. Validarea experimentală a predicției teoretice a temperaturii gazelor de ardere

#### a. Cameră cu ventilare forțată - Predicția temperaturii gazelor arse

Deal și Beyler (1990) au propus un model simplu de calcul a temperaturii medii într-o încălț ventilată forțată. Potrivit acestui model creșterea medie de temperatură  $\Delta T$ , în raport cu temperatura ambiantă, poate fi calculată în funcție de debitul volumic  $\dot{V}$ , cu relația:

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}_t}{\dot{V} * \rho * c_p + h_k * A_T}, [K] \quad (3.63)$$

unde:

- $\rho$  densitate a aerului, [kg/m<sup>3</sup>];
- $c_p$  căldura specifică a aerului, [J/kg K];
- $A_T$  suprafață totală a incintei, [m<sup>2</sup>];
- $h_k$  coeficient de pierdere de căldură a incintei, [w/(m<sup>2</sup>\*K)], care include atât efectul de convecție, cât și cel de radiație al tavanului.

După Deal și Beyler (1990) și Beyler (1991),  $h_k$  poate fi aproximat pentru un timp  $t$ , mai mic decât timpul de penetrare  $t_p$ , cu ajutorul următoarei relații:

$$h_k = C_1 \text{Max} \left\{ \sqrt{\frac{\lambda_w \rho_w c_w}{t_p}}, \frac{k_w}{\delta_w} \right\} \quad (3.64)$$

unde:

- $t_p$  timpul necesar unei termice generate în interiorul camerei de testare să atingă suprafața exterioară a peretelui, calculată cu relația 3.65:

$$t_p = \frac{\rho_w c_w}{\lambda_w} * \left( \frac{\delta_w}{2} \right)^2 \quad (3.65)$$

în care:

$\lambda_w$ ,  $\rho_w$ ,  $c_w$  și  $\delta_w$  sunt respectiv: conductivitatea termică a gazelor de ardere, densitatea gazelor de ardere, căldura specifică a gazelor de ardere și grosimea peretelui.

Pentru parametrul  $C_1$  din relația 3.64., autorii (Deal și Bayler 1990) au adoptat valoarea de 0.4, valoarea rezultată din corelarea datelor teoretice cu cele experimentale.

Pentru aceasta cameră de testare valorile parametrilor de mai sus sunt următoarele:

$$\lambda_w = 98 [W/m*K] \quad \rho_w = 2300 \text{ kg/m}^3 \quad c_w = 653 \text{ Kj/(kg K)}$$

Rezultă:

$$\sqrt{\lambda_w * \rho_w * c_w} = 1213 [W/(m^2K) * s^{1/2}]$$

Pentru geometria camerei reprezentata de:

- suprafața totală:  $A_T = 63.2 \text{ m}^2$ ;
- grosime a peretelui,  $\delta_w = 5 \text{ cm}$ ;
- timpul de penetrare termică,  $t_p = 958 \text{ [s]}$ , conform ecuației 3.65.

Valorile creșterii de temperatură  $\Delta T$  calculate cu ecuația 3.63. la intervale de 1 minut, corespunzătoare celor 7 termocuple montate în camera, sunt cuprinse în tabelul de mai jos.

În tabel 3.6. sunt prezentate valorile creșterii de temperatură obținute prin calcul cu valori ale coeficientului  $C_1$  de 0,4 respectiv 0,165. Tot odată în tabel sunt cuprinse creșterile de temperatură măsurate.

Tabel 3.6. Valorile creșterii de temperatură.

Inaltime, H [m]	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8	$\Delta T$ mas.	$\Delta T$ -calc. $C_1=0,4$	$\Delta T$ -calc. $(C_1=0,165)$
Temp. [°C] (min 0)	18	18	18	18	18	18	18	0	0	0
Temp. [°C] (min 1)	18,5	19	18,5	18	20	25,5	32	3,642	7,4375	2,133
Temp. [°C] (min 2)	20	27,5	30	34	36	38	40	14,214	11,366	10,089
Temp. [°C] (min 3)	27,5	31	36	37,5	38	39	44	18,142	16,625	15,098
Temp. [°C] (min 4)	30	36,5	41	44	45,5	41,5	50	23,214	19,7	19,339
Temp. [°C] (min 5)	35	40	45	48	49	50	57	28,285	25,223	24,285
Temp. [°C] (min 6)	35	43	45,5	50	51	52,5	59	30	26,664	25,464
Temp. [°C] (min 7)	38	46,5	49,5	51,5	54	55,5	61,5	32,928	29,101	28,437

Din tabel se poate observa că pentru același punct, temperatura crește în timp, același sens fiind înregistrat și pe verticală. Din tabel se pot observa abateri între creșterea de temperatură măsurată și cea calculată. În ce privește creșterea de temperatură calculată, cu  $C_1 = 0,4$  și creșterea de temperatură calculată cu  $C_1 = 0,165$ , din tabel se poate observa că nu există diferențe majore începând cu minutul 2 de experimentare, respectiv diferențe de circa 5%.

Abaterea creșterii de temperatura teoretice,  $\Delta T$ , față de cea experimentală este reprezentată grafic în figura 3.17 de mai jos.

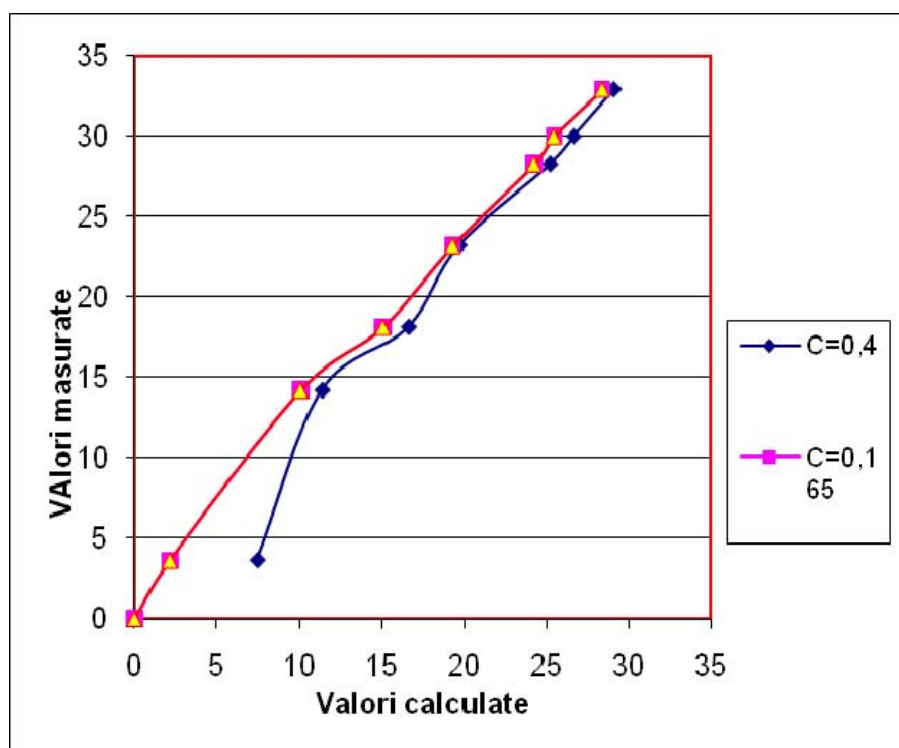


Figura 3.17. Abaterea creșterii de temperatura teoretice,  $\Delta T$ , față de cea experimentală.

Valori calculate vs. Măsurate ale temperaturii pentru ACH 30.

Temperaturile calculate s-au dovedit a fi mult mai mici decât cele măsurate. Explicația acestor diferențe constă în modul de calcul al coeficienților pierderilor de căldură ale incintei  $h_k$ , pentru care este posibil să se fi adoptat o valoare prea mare a coeficientului  $C_1$ .

În cazul acestor experimente, pentru o mai bună apropiere între valorile calculate și cele măsurate, coeficientul  $C_1$  trebuie să ia valoarea de 0.165, ceea ce conduce la  $h_k = \frac{200}{\sqrt{t}}$  [w/(m<sup>2</sup> K)].

Creșterea de temperatura  $\Delta T$  este calculată cu această nouă valoare a lui  $C_1$ . Rezultând din calcul, valori ale temperaturilor mult mai apropiate de cele măsurate.

#### b. Camera fără ventilare.

Dacă exhaustoarele sunt oprite atunci camera de testare poate fi considerată ca o camera închisă, fără ventilare.

Pentru calculul creșterii de temperatură  $\Delta T$  Bayler (1991), recomandă următoarea relație:

$$\Delta T = \frac{2K_2}{K_1^2} * \left\{ K_1 \sqrt{t-1} + e^{-K_1 \sqrt{t}} \right\} \quad (3.66)$$

unde:

$$K_1 = \frac{2 * (0.4 * \sqrt{\lambda_w * \rho_w * c_w}) * A_T}{m * c_p}; \quad K_2 = \frac{\dot{Q}_t}{m * c_p}$$

Relația 3.66. este valabilă pentru un debit constant de căldură eliberat  $Q_t$ , pentru calculul lui  $h_k$  se utilizează  $C_1 = 0.4$ , iar masa de aer din cameră este de:  $m = 32.54$  [kg],

Rezultă:

$$K_1 = \frac{2(0.4 * 1213) * 63.2}{32.54 * 1009} = 1.8679$$

$$K_2 = \frac{\dot{Q}_t}{32.54 * 1009} = \frac{\dot{Q}_t}{328.32}$$

Tabel.3.7. Valorile creșterii de temperatura  $\Delta T$ , calculate și măsurate la arderea lemnului in camera fără ventilare.

Înălțime H [m]	1	1,3	1,6	1,9	2,2	2,5	2,8
Natural (5min)	37	41	43	46	49	55	60
$\Delta T$ mas. (nat.)	19	23	25	28	31	37	42
$\Delta T$ calculat	15,38	16,07	17,5	22,15	23,82	25	37,23

Din tabelul 3.7. se observă că temperaturile cresc pe înălțimea camerei. Valorile creșterii de temperatură  $\Delta T$ , cresc odată cu creșterea înălțimii. Valorile creșterii de temperatură  $\Delta T$  măsurate sunt mai mari decât cele calculate.

Abaterea dintre creșterea de temperatură măsurată și cea calculată este ilustrată grafic în figura 3.18.

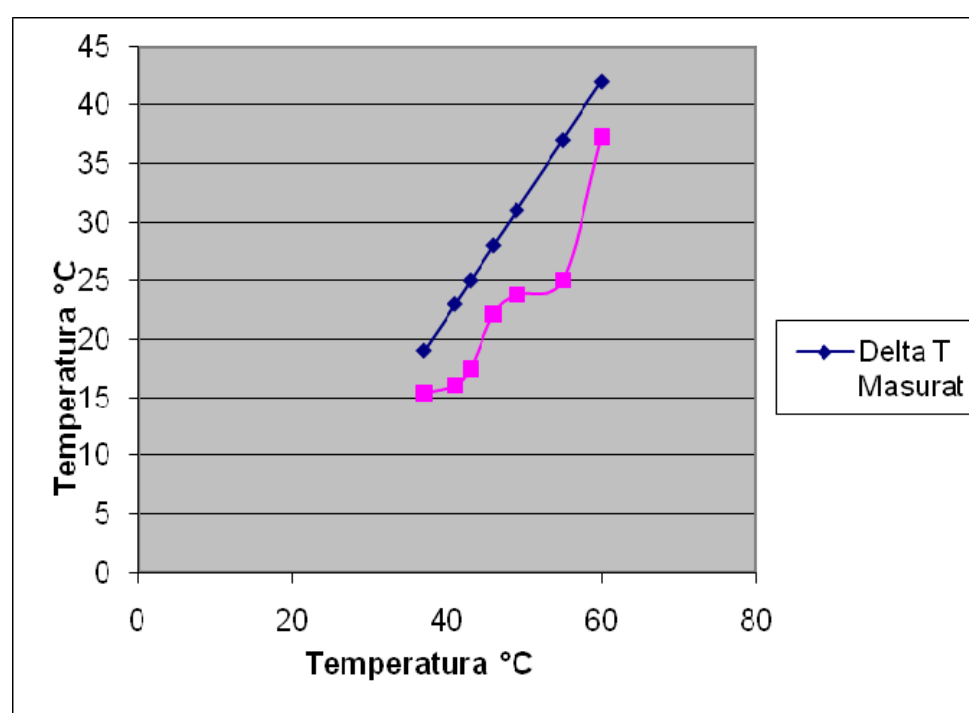


Figura 3.18. Abaterea dintre creșterea de temperatură măsurată și cea calculată

Creșterea de temperatură în camera neventilată pentru arderea lemnului în camera fără ventilație.

Creșterile de temperatură obținute prin calcul, cu valoarea  $C_1 = 0.4$  sunt mult mai mici decât valorile măsurate. Reluând calculul creșterii de temperatură pentru valoare  $C_1 = 0.165$  se obțin valori ale acestuia mult mai apropiate de cele măsurate.

Analizând rezultatele obținute experimental vs. teoretic privind temperatura gazelor de ardere, respectiv creșterea de temperatură pe verticală într-o incintă ventilată și neventilată, se desprind următoarele concluzii:

- datele teoretice sunt în acord cu cele experimentale dacă, pentru coeficientul  $C_1$ , care intră în expresia coeficientului de pierdere de căldură al camerei, se adoptă valoarea de 0.165.
- ecuațiile (3.63) și (3.66) s-au dovedit a fi bune pentru estimarea temperaturii gazelor fierbinți, datorită intensității mici a focului într-o incintă ventilată forțat.
- investigarea mai detaliată a incintelor mari, ventilate forțat poate să facă apel la modelele de calcul propuse de (Chow și MK 1995), dar aceasta necesită încă o serie de experimentări și validarea acestora.

### 3.6. Analiza critică a documentării

Analizând documentația, prezentată în literatură, referitoare la fazele proceselor de ardere ale unor materiale combustibile solide, la relațiile care descriu aceste faze, precum și relațiile criteriale pentru modelele fizice dezvoltate de unii specialiști se desprind următoarele concluzii:

- există relații de calcul pentru creșterea temperaturii gazelor de ardere, în camere ventilate și neventilate, relații care au fost validate experimental;
- există relații de calcul pentru evaluarea fluxului termic transferat prin unitatea de suprafață a incintei; relații validate experimental prin relațiile de calcul pentru creșterea temperaturii (unde fluxul termic transferat este o componentă a acesteia)
- literatura furnizează relații pentru calculul debitului de gaze evacuate însă nu sunt informații privind validarea experimentală a acestora;
- literatura prezintă relații pentru calculul fluxului de căldură transferat prin convecție și radiație, de la gazele de ardere la suprafața interioară a incintei. Acest flux de căldură apare ca un coeficient mediu total, nerecomandând o relație explicită pentru calculul acestuia, relația 3.35.;

În același timp se are în vedere faptul că există foarte puține ghiduri tehnice care utilizează calculații bazate pe timp pentru a da relații foarte importante între timpul necesar pentru evacuare și timpul disponibil pentru evacuare, respectiv informații suplimentare asupra timpului în care oamenii pot ajunge departe de pericol, îndeosebi în magazine și clădiri cu aglomerări de persoane, inclusiv cei în incapacitate de a se deplasa.

Față de cele prezentate mai sus doctorandul își stabilește următoarele direcții de cercetare:

- realizarea unui model matematic pentru calculul fluxului de căldură transferat prin radiație de la gazele de ardere la o suprafață solidă (element de construcție), pentru calculul fluxului de căldură transmis prin radiație de la pereții adiacenți ai unei incinte către elementul de construcție. Pentru calculul fluxului de căldură transmis prin radiație de la pereții adiacenți către elementul de construcție utilizează metoda coeficienților Poleak;
- realizarea unui model fizic care să permită studiul proceselor de ardere a materialelor combustibile solide;
- validarea experimentală a fluxului de căldură transferat prin radiație elementului de construcție;
- validarea experimentală a temperaturilor în straturile elementului de construcție
- validarea experimentală a temperaturii elementului de construcție pe fața neexpusă la foc și implicit validarea experimentală a temperaturii de aprindere.

## Cap. 4. MODELAREA PROCESELOR DE TRANSFER DE CĂLDURĂ, PRIN RADIATIE. COEFICIENȚII POLEAK

Obiectivele capitolului 4 constau în:

- modelarea proceselor de transfer de căldură prin radiație de la pereții incintei la elementul de construcție
- determinarea temperaturii suprafeței interioare și exterioare a probei, funcție de timp, în condițiile unei incinte de testare în care temperatura este progresiv ridicată conform unei **curbe standard**.

Modelul matematic propus descrie fenomenele complexe de transfer de căldură, în regim nestaționar. Având în vedere faptul că elementul de construcție supus încercărilor primește căldură, prin radiație, de la toate suprafețele componente incintei cuptorului.

Modelul matematic surprinde procese de transfer de căldură și de acumulări de căldură, funcție de temperatura momentană impusă mediului din cuptor.

Cuptorul de testare fiind un sistem radiant închis de suprafețe, modelarea transferului de căldură prin radiație între suprafețele cuptorului se realizează apelând la metoda teoriei Poleak.

Pentru modelarea proceselor de transfer de căldură între suprafețele cuptorului se au în vedere următoarele particularități, după [34] ( N.N. ANTONESCU, ș.a.-2011):

- pereții interiori incintei cuptorului sunt considerați o suprafață izotermă și în consecință transferul de căldură prin radiație este uniform. Această ipoteză fiind justificată de faptul că incinta este de dimensiuni mari, cu pereți de structură identică, la care existența unei flăcări de combustibil gazos și cu debit mic de combustibil, nu aduce perturbări izotermicității cuptorului. În sprijinul acestei ipoteze este și faptul că debitul mediu de combustibil gazos al arzătoarelor este de  $B = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ , rezultând o putere calorică de  $H_i = 35500 \text{ kJ}/\text{Nm}^3$  și volumul cuptorului de  $V = 13 \text{ m}^3$ , reprezentă o încărcare termică volumetrică  $Q_v = B \cdot H_i / 3600 / V = 6.11 \text{ kW}/\text{m}^3$ , încărcare termică care poate fi neglijabilă față de încărcarea uzuală de  $300 \text{ kW}/\text{m}^3$  a unui cuptor de încălzire. Concluzia este că un astfel de proces redus de ardere nu va crea neuniformități termice sesizabile în interiorul cuptorului, ceea ce s-a constatat și experimental;

- sursa de încălzire a cuptorului este radiația gazelor de ardere din volumul cuptorului, debitul de combustibil fiind variat automat pentru respectarea curbei standard de ridicare a temperaturii în cuptor;

- suprafața receptoare de căldură utilă a cuptorului este peretele din față al cuptorului (peretele de probă / peretele suport) compus dintr-un perete cadru de construcție în care este încastrat elementul de construcție încercat. Atât peretele suport cât și proba de încercare au caracteristici termo-fizice diferite: coeficient de emisie, conductibilitate termică, căldură specifică, deci aceste suprafețe se constituie în suprafețe diferite termic de incinta de pereți ai cuptorului;

- întregul sistem funcționează în regim nestaționar, *existând o curbă temperatură-timp care trebuie respectată în timpul probei*. Cuptorul pornește de la rece și se încălzește apoi într-un timp dat până la temperatura maximă de încercare a probei.

Deoarece există un transfer de căldură complex între toate elementele constructive ale cuptorului și elementul de testare, temperaturile suprafețelor nu se pot determina izolat pentru probă ci numai în contextul de ansamblu al întregului sistem, deci a tuturor suprafețelor, pe fețele interioare și exterioare.

Pentru modelarea procesului de transfer de căldură transmis prin radiație între suprafețe cu diferite orientări s-a utilizat metoda lui Poleak pentru determinarea coeficienților unghiulari de radiație reciprocă, între suprafețe care formează un sistem închis.

Pornind de la relația generală care exprimă fluxul de căldură transmis prin radiație, de un corp 1 către un al doilea corp 2, se poate separa termenul denumit coeficientul lui Poleak, utilizând următoarele relații:

$$\Phi_{12} = \Phi_{21} = \int_{F_1} \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 * \cos \varphi_2}{\pi * r_{12}^2} * dF_1 * dF_2 \quad (4.1)$$

$$\varphi_{12} = \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 * \cos \varphi_2}{\pi * r_{12}^2} * dF_2 \quad (4.2)$$

și rezultă:

$$\Phi_{12} = \int_{F_1} \varphi_{12} * dF_1 = \bar{\varphi}_{12} * dF_1 \quad (4.3)$$

Similar se poate separa termenul:

$$\varphi_{21} = \int_{F_2} \frac{\cos \varphi_1 * \cos \varphi_2}{\pi * r_{12}^2} * dF_1 \quad (4.4)$$

și rezultă:

$$\Phi_{12} = \int_{F_2} \varphi_{21} * dF_2 = \bar{\varphi}_{21} * dF_2 \quad (4.5)$$

Având în vedere fluxul de căldură transferat prin radiație între suprafețele 1 și 2, exprimat cu relația:

$$\dot{Q}_{12} = C_{12} * (T_1^4 - T_2^4) * \Phi_{12} \quad (4.6)$$

rezultă:

$$Q_{12} = C_{12} * (T_1^4 - T_2^4) * F_1 * \bar{\varphi}_{1,2} = C_{12} * (T_1^4 - T_2^4) * F_2 * \bar{\varphi}_{21} \quad (4.7)$$

Comparând căldura transmisă prin radiație de către suprafața 1:

$$Q_1 = C_{12} * (T_1^4 - T_2^4) * F_1 \quad (4.8)$$

cu căldura primită prin radiație de suprafața 2:

$$Q_{12} = C_{12} * (T_1^4 - T_2^4) * F_1 * \varphi_{12} \quad (4.9)$$

rezultă coeficientul Poleak, dat de relația:

$$\varphi_{12} = \frac{Q_{12}}{Q_1} \quad (4.10)$$

Relația de mai sus, exprimă sensul fizic al coeficientului lui Poleak, care ne arată proporția din energia totală radiată de corpul 1 pe care o primește corpul 2.

Pentru un sistem de suprafețe care formează un sistem închis, energia radiată de corpul 1 este dată de suma energiilor primite de cele „n” corpuri, conform relației:

$$Q_1 = Q_{12} + Q_{13} + \dots + Q_{1n} \quad (4.11)$$

Împărțind ecuația 4.11. la energia totală radiată de corpul 1, se obține relația:

$$\frac{Q_{12}}{Q_1} + \frac{Q_{13}}{Q_1} + \dots + \frac{Q_{1n}}{Q_1} = 1 \quad (4.12)$$

Ținând seama de relațiile 4.11. și 4.12. se obține relația: 4.13., care ne arată că suma coeficienților lui Poleak, care se raportează la o suprafață într-un sistem închis este 1.

$$\bar{\varphi}_{12} + \bar{\varphi}_{13} + \dots + \bar{\varphi}_{1n} = 1 \quad \text{sau} \quad \sum \bar{\varphi}_{1i} = 1 \quad (4.13)$$

Ținând seama de relația:

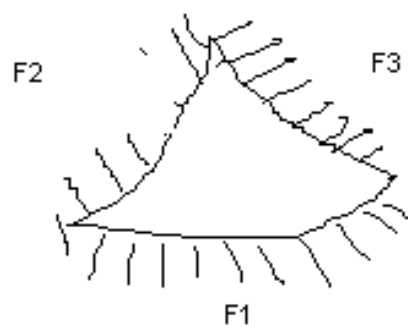
$$\Phi_{12} = \bar{\varphi}_{12} * F_1 \quad (4.14)$$

Rezultă următoarea relație, pentru un sistem închis:

$$\Phi_{12} + \Phi_{13} + \dots + \Phi_{1n} = F_1 * (\bar{\varphi}_{12} + \bar{\varphi}_{13} + \dots + \bar{\varphi}_{1n}) \quad \text{sau} \quad \sum \Phi_{1i} = F_1 \quad (4.15)$$

Concluzia teoriei lui Poleak este că **factorul de radiație reciprocă într-o incintă închisă depinde numai de mărimea suprafeței și nu depinde de poziția sau forma ei.**

Astfel dacă, pentru situația analizată, s-ar utiliza cazul a trei suprafețe care formează un sistem închis, așa cum este prezentat în figura de mai jos, se obțin următoarele ecuații:



$$\begin{cases} \Phi_{12} + \Phi_{13} = F1 \\ \Phi_{21} + \Phi_{23} = F2 \\ \Phi_{31} + \Phi_{32} = F3 \end{cases} \quad (4.16)$$



Deoarece  $\Phi_{12} = \Phi_{21}$ ,  $\Phi_{13} = \Phi_{31}$  și  $\Phi_{23} = \Phi_{32}$ , rezolvarea sistemului duce la următoarele soluții:

$$\begin{aligned}\Phi_{12} &= \frac{F_1 + F_2 - F_3}{2} \\ \Phi_{13} &= \frac{F_1 - F_2 + F_3}{2} \\ \Phi_{23} &= \frac{-F_1 + F_2 + F_3}{2}\end{aligned}\quad (4.17)$$

Iar coeficienții lui Poleak:

$$\begin{aligned}\bar{\varphi}_{12} &= \frac{F_1 + F_2 - F_3}{2 * F_1}; & \bar{\varphi}_{21} &= \frac{F_1 + F_2 - F_3}{2 * F_2}, \\ \bar{\varphi}_{13} &= \frac{F_1 - F_2 + F_3}{2 * F_1}; & \bar{\varphi}_{31} &= \frac{F_1 - F_2 + F_3}{2 * F_3}, \\ \bar{\varphi}_{23} &= \frac{-F_1 + F_2 + F_3}{2 * F_2}; & \bar{\varphi}_{32} &= \frac{-F_1 + F_2 + F_3}{2 * F_3}\end{aligned}\quad (4.18)$$

În calculul schimbului de căldură între suprafețele sistemului, se vor utiliza următoarele relații:

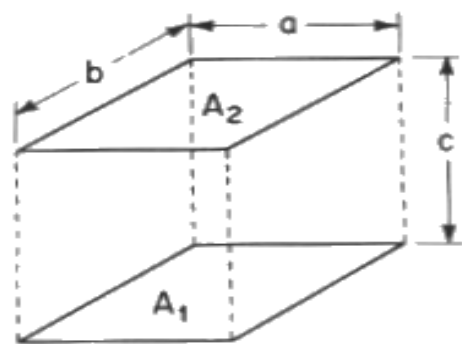
$$\begin{aligned}Q_{12} &= C_{12} * (T_1^4 - T_2^4) * F_1 * \bar{\varphi}_{12} = C_{12} * (T_1^4 - T_2^4) * \frac{F_1 + F_2 + F_3}{2} \\ Q_{13} &= C_{13} * (T_1^4 - T_3^4) * F_1 * \bar{\varphi}_{13} = C_{13} * (T_1^4 - T_3^4) * \frac{F_1 + F_3 - F_2}{2} \\ Q_{23} &= C_{23} * (T_2^4 - T_3^4) * F_2 * \bar{\varphi}_{23} = C_{23} * (T_2^4 - T_3^4) * \frac{F_2 + F_3 - F_1}{2}\end{aligned}\quad (4.19)$$

Este de remarcat faptul că o suprafață, (de exemplu cea de a 3-a) poate fi fictivă, adică luată în considerare numai pentru necesitățile de calcul.

În cazurile uzuale care implică suprafețe plane paralele sau perpendiculare, se pot folosi formulele analitice, determinate prin calculul integralelor corespunzătoare.

**Pentru două suprafețe rectangulare identice, paralele**, situate la distanța „c”, una față de cealaltă (figura 4.1.) se obține expresia factorului de forma:

$$F_{1-2} = \frac{2}{\pi XY} \left\{ \ln \left[ \frac{(1+X^2)(1+Y^2)}{1+X^2+Y^2} \right]^{1/2} + X\sqrt{1+Y^2} \tan^{-1} \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} + Y\sqrt{1+X^2} \tan^{-1} \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} - X \tan^{-1} X - Y \tan^{-1} Y \right\} \quad (4.20)$$



$A_1$  – aria (suprafața) pardoselii;  
 $A_2$  – aria (suprafața) tavanului;  
 $A_1 = A_2$   
 $a$  – lățimea;  
 $b$  – adâncimea;  
 $c$  – înălțimea.

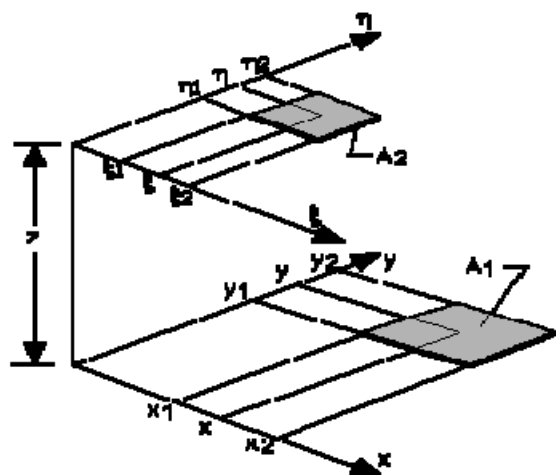
$$X = \frac{a}{b}; \quad Y = \frac{b}{c}.$$

Fig. 4.1. Două suprafețe rectangulare identice și paralele.

**Pentru două suprafețe rectangulare de forme diferite dar paralele**, situate la distanța „z”, una față de cealaltă (figura 4.2.) se obține expresia factorului de formă:

$$F_{1-2} = \frac{1}{(x_2 - x_1)(y_2 - y_1)} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (-1)^{(i+j+k+l)} G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l)$$

$$G = \frac{1}{2\pi} \left( \begin{aligned} & (y - \eta) \left[ (x - \xi)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{y - \eta}{\left[ (x - \xi)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ & + (x - \xi) \left[ (y - \eta)^2 + z^2 \right]^{1/2} \tan^{-1} \left\{ \frac{x - \xi}{\left[ (y - \eta)^2 + z^2 \right]^{1/2}} \right\} \\ & - \frac{z^2}{2} \ln \left[ (x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2 \right] \end{aligned} \right) \quad (4.21)$$



$A_1$  – aria (suprafața) pardoselii;  
 $A_2$  – aria (suprafața) tavanului;  
 $A_1 \neq A_2$

Fig. 4.2. Două suprafețe rectangulare având forme diferite și paralele.

**Pentru două suprafețe rectangulare identice și perpendiculare**, una față de cealaltă (figura 4.3.) se obține expresia factorului de formă:

$$F_{1-2} = \frac{1}{W\pi} \left\{ W \tan^{-1} \frac{1}{W} + H \tan^{-1} \frac{1}{H} - \sqrt{H^2 + W^2} \tan^{-1} \sqrt{\frac{1}{H^2 + W^2}} + \right. \quad (4.22)$$

$$\left. + \frac{1}{4} \ln \left[ \frac{(1+W^2)(1+H^2)}{1+W^2+H^2} \left[ \frac{W^2(1+W^2+H^2)}{(1+W^2)(W^2+H^2)} \right]^{W^2} \left[ \frac{H^2(1+H^2+W^2)}{(1+H^2)(H^2+W^2)} \right]^{H^2} \right] \right\}$$

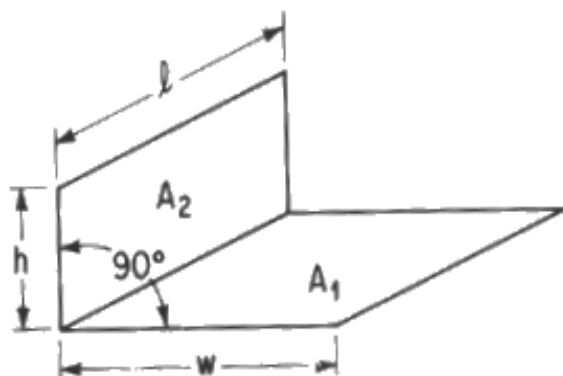


Fig. 4.3. Două suprafețe rectangulare având forme diferite și perpendiculare.

$A_1$  – aria (suprafața) pardoselii;

$A_2$  – aria (suprafața) tavanului;

Suprafața  $A_1$  este perpendiculară pe suprafața  $A_2$ ;

$h$  - înălțimea (peretelui suport-de testare);

$w$  – lățimea (peretelui suport-de testare);

$l$  – adâncimea (pereții laterali).

$$H = \frac{h}{l};$$

$$W = \frac{w}{l}.$$

**Pentru două suprafețe rectangulare de forme diferite și perpendiculare**, una față de cealaltă (figura 4.4.) se obține expresia factorului de formă:

$$F_{1-2} = \frac{1}{(x-x_1)(y_2-y_1)} \sum_{l=1}^2 \sum_{k=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 [(-1)^{i+j+k+l} G(x_i, y_j, \eta_k, \xi_l)] \quad (4.23)$$

$$G = \frac{1}{2\pi} \left\{ (y-\eta) \sqrt{x^2 + \xi^2} \tan^{-1} K - \frac{1}{4} \left[ (x^2 + \xi^2) \ln(1+K^2) - (y-\eta)^2 \ln \left( 1 + \frac{1}{K^2} \right) \right] \right\}$$

$$K = \frac{(y-\eta)}{\sqrt{x^2 + \xi^2}}$$

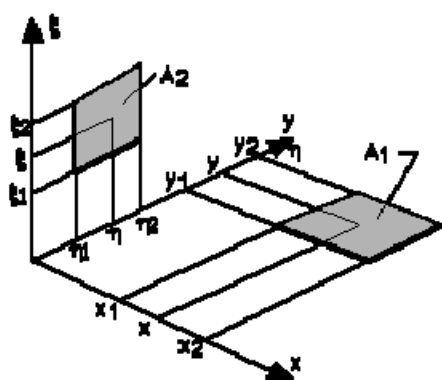


Fig. 4.4. Două suprafețe rectangulare având forme diferite și paralele.

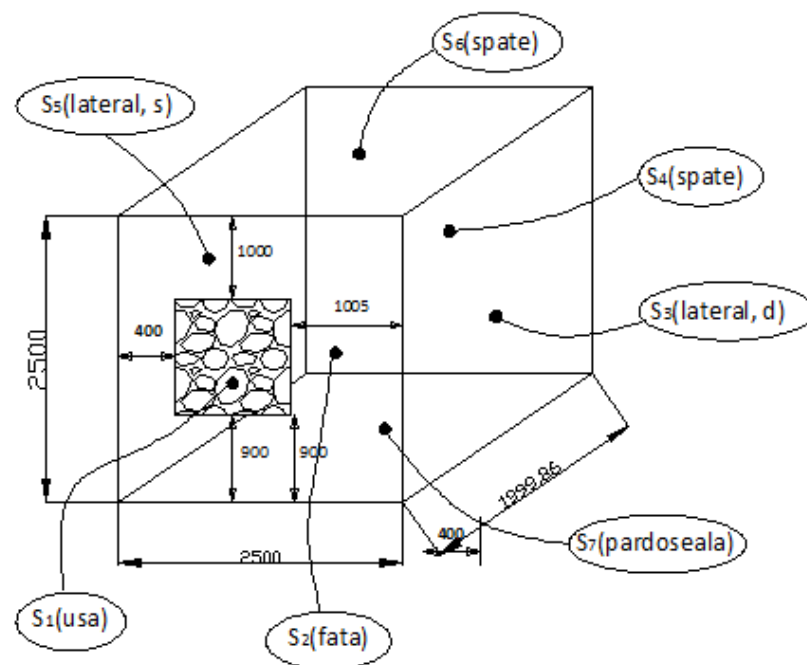
$A_1$  – aria (suprafața) pardoselii;

$A_2$  – aria (suprafața) tavanului;

$A_1$  perpendiculară pe  $A_2$ ;

Pentru prezentul model matematic a fost necesară trecerea de la forma fizică reală a cuptorului de testare, la o formă echivalentă funcțională pe care să poată fi studiat procesul de transfer de căldură prin radiație.

În figura 4.5. este prezentată construcția geometrică a instalației experimentale – cuptorului de testare la foc și identificarea suprafețelor de transfer de căldură prin radiație.



\*Toate dimensiunile în mm.

Figura 4.5. Dispunerea probei în peretele suport și dezvoltarea suprafețelor.

Legendă:

$S_1$  – suprafața elementului de probă (simularea ușii);

$S_2$  – suprafața peretelui suport (peretele de probă a cuptorului);

$S_3$  – suprafața peretelui lateral dreapta;

$S_4$  – suprafața peretelui din spatele cuptorului, de aceleași dimensiuni ca peretele frontal;

$S_5$  – suprafața peretelui lateral stânga, cu aceleași dimensiuni cu peretele lateral dreapta;

$A_2 = S_6$  – suprafața peretelui de sus – tavan;

$A_1 = S_7$  – suprafața pardoseală.

În figura 4.6. sunt prezentate dimensiunile geometrice ale cuptorului și ale probei de testat. Tot odată sunt prezentate și dimensiunile de încadrare a probei pe peretele suport.

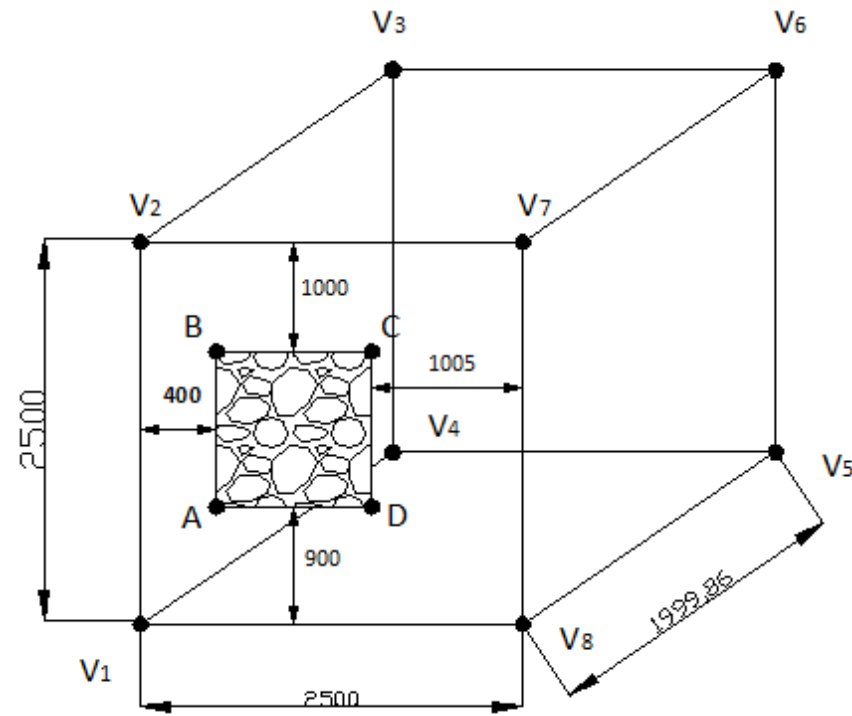


Figura 4.6. Geometria și dimensiunile suprafețelor standului de testare.

În figura 4.7. este prezentat peretele frontal și împărțirea acestuia în suprafețe de calcul, având în vedere poziția de montaj a probei. Peretele frontal a fost împărțit în cinci suprafețe rectangulare, suprafețele  $S_9$  și  $S_2$  sunt de aceleași dimensiuni.

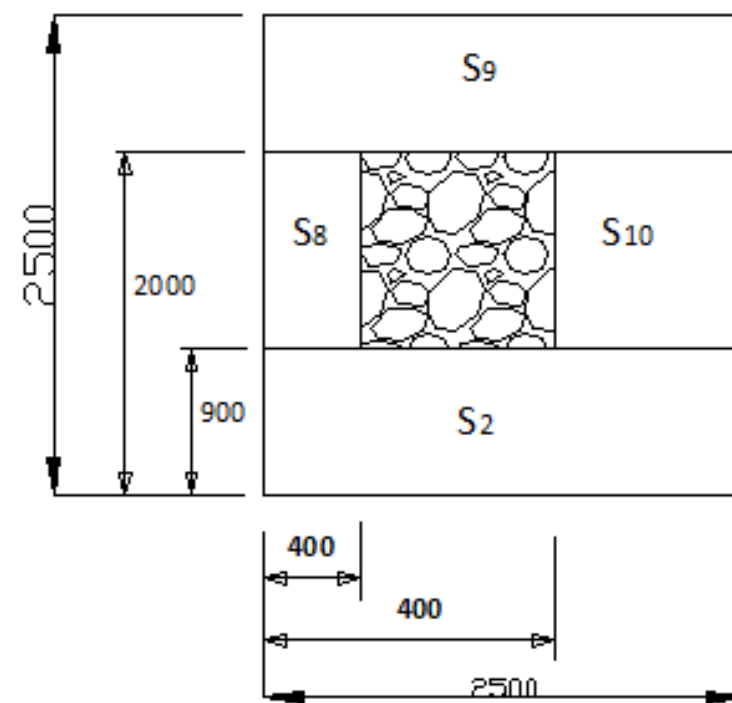


Figura 4.7. Geometria și dimensiunile suprafețelor probei pe peretele suport.

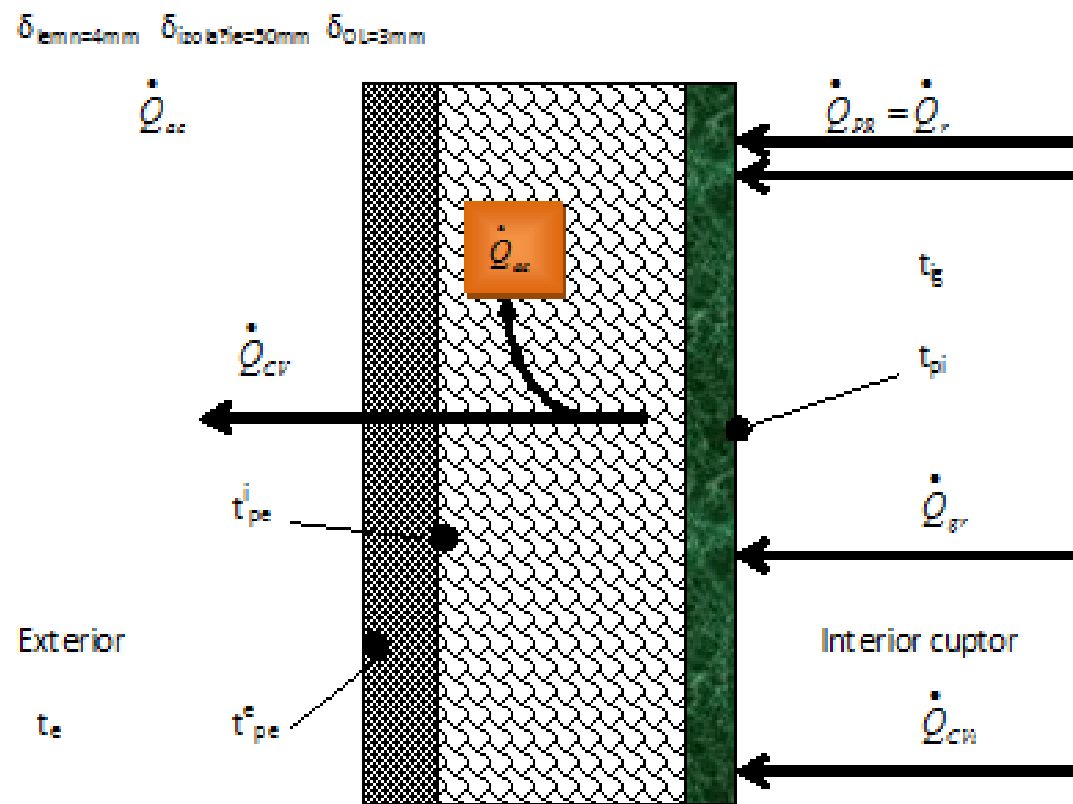


Figura 4.8. Vedere în secțiune a probei. Fluxurile de căldură transmise probei.

**Modelul matematic** este reprezentat de următoarele ecuații:

$$\dot{Q}_{ij} = C_{ij} * (T_i^4 - T_j^4) * \Phi_{ij}$$

unde:

-  $C_{ij}$  este calculat cu relația:  $C_{ij} = \frac{(C_i * C_j)}{C_0} \zeta$

-  $\Phi_{ij}$  este calculat cu relația:  $\Phi_{ij} = \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{(\cos \Phi_i * \cos \Phi_j)}{\pi * r^2} * dS_i * dS_j$

Introducând coeficientul lui Poleak :

-  $\Phi_{ij} = \int_{S_j} \frac{(\cos \Phi_i * \cos \Phi_j)}{\pi * r^2} * dS_j$

Rezultă:

$\Phi_{ij}$  calculat cu relația:  $\Phi_{ij} = \int_{S_j} \phi_{ij} * dS_j = \phi_{ij}^- * S_j$

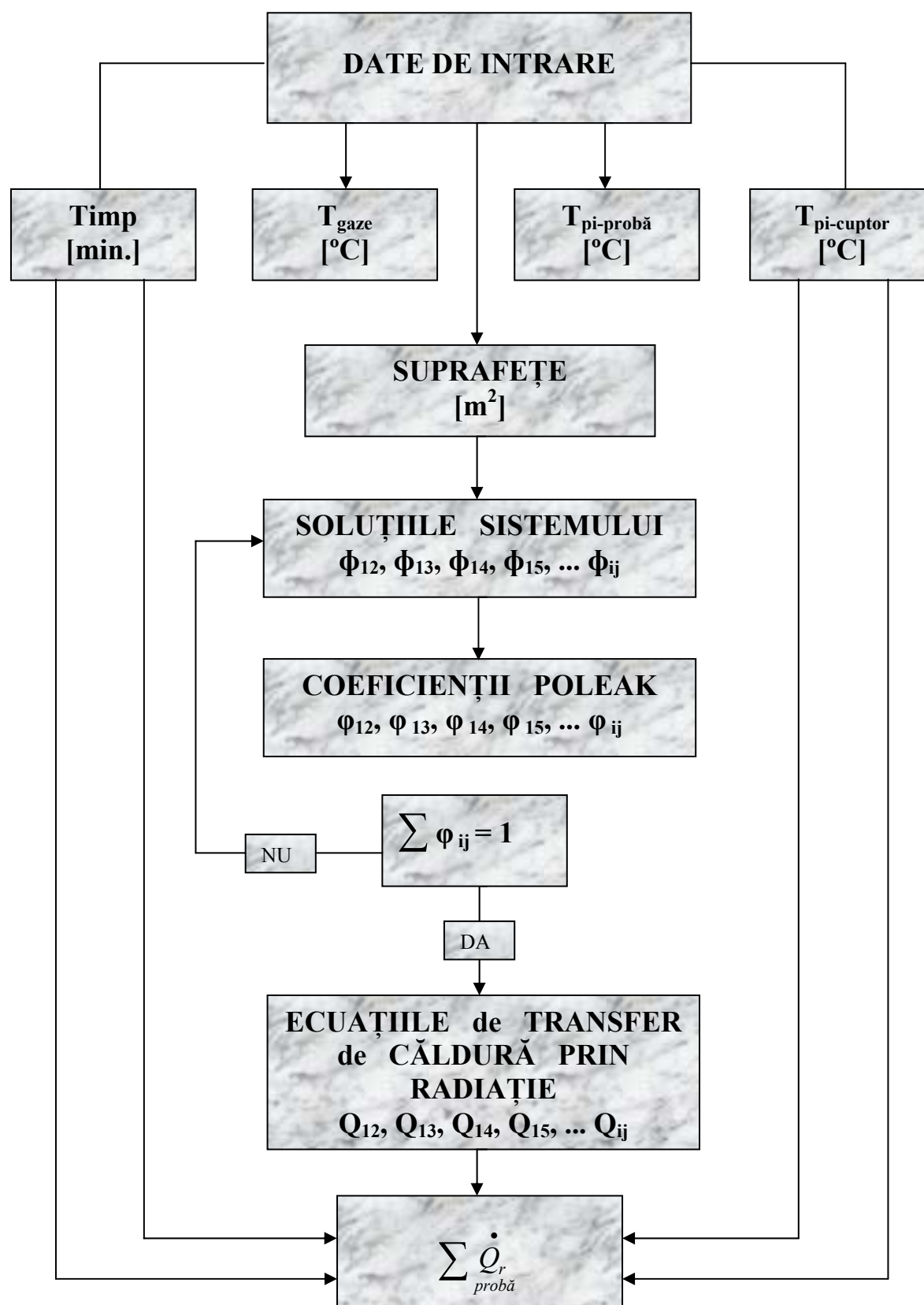


Fig. 4.9. Schema logică pentru calculul coeficienților Poleak și al fluxului de căldură transmis prin radiație.

Ținând seama de ecuațiile de mai sus (4.20 și 4.22), de caracteristicile geometrice ale suprafețelor care emit radiație (tabel 4.1), de emisivitatea corespunzătoare fiecărei suprafețe (tabel 4.1) și de temperaturile acestora (tabelul 4.3), s-au efectuat simulări numerice în vederea determinării factorilor de formă (coeficienții Poleak) și a fluxului total de căldură transmis prin radiație.

Tabel. 4.1. Caracteristicile geometrice și emisivitatea suprafețelor care emit radiație.

Suprafața [m <sup>2</sup> ]	1.155	2.25	5	6.25	5	5	5	0.44	1.25	0.55
Emisivitatea [-]	0.85	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8

Valorile coeficienților de formă, corespunzători celor zece suprafețe, obținuți în urma simulării numerice sunt cuprinse în tabelul 4.2.

Tabel 4.2. Valorile factorilor de formă.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	0	0	0,028849	0,056437	0,052938	0,046597	0,03207	0	0	0
A2	0	0	0,079307	0,090727	0,079307	0,033706	0,144272	0	0	0
A3	0,124887	0,176237	0	0,184253	0,170924	0,184222	0,184222	0,063723	0,161281	0,330011
A4	0,305394	0,252019	0,230316	0	0,230316	0,230316	0,230316	0,247881	0,234336	0,278718
A5	0,229169	0,176237	0,170924	0,184253	0	0,184222	0,184222	0,427707	0,161281	0,087069
A6	0,201718	0,074901	0,184222	0,184253	0,184222	0	0,170924	0,1522	0,380779	0,179331
A7	0,138833	0,320605	0,184222	0,184253	0,184222	0,170924	0	0,10849	0,062323	0,124872
A8	0	0	0,005608	0,017451	0,037638	0,013394	0,009547	0	0	0
A9	0	0	0,04032	0,046867	0,04032	0,095195	0,015581	0	0	0
A10	0	0	0,076233	0,051507	0,020113	0,041425	0,028845	0	0	0
	1,000001	0,999999	1	1,000001	1	1	1	1,000001	1	1,000001

Analizând valorile obținute prin simulare numerică se observă că este îndeplinită condiția referitoare la: **suma coeficienților Poleak, care se raportează la o suprafața închisă, este egală cu 1.**

Pe baza coeficienților de formă rezultați prin simulare numerică (tabelul 4.2) au fost calculate fluxurile de căldură transferate prin radiație de la suprafețele interioare ale cuptorului la probă. Valorile acestora sunt cuprinse în tabelul 4.3.

Tabel 4.3.

Timp [min]	t <sub>gaze</sub> [°C]	t <sub>1</sub> [°C]	t <sub>2</sub> [°C]	t <sub>3</sub> [°C]	t <sub>4</sub> [°C]	t <sub>5</sub> [°C]	t <sub>6</sub> [°C]	t <sub>7</sub> [°C]	t <sub>8</sub> [°C]	t <sub>9</sub> [°C]	t <sub>10</sub> [°C]	Q̇ [W]
0	44,6	28,00	28,00	48,08	48,08	48,08	48,08	48,08	28,00	28,00	28,00	129
1	200	27,97	27,97	82,86	82,86	82,86	82,86	82,86	27,97	27,97	27,97	1058
2	307	27,98	27,98	203,06	203,06	203,06	203,06	203,06	27,98	27,98	27,98	2294
3	454,6	28,25	28,25	288,68	288,68	288,68	288,68	288,68	28,25	28,25	28,25	4851
4	478,1	28,65	28,65	346,48	346,48	346,48	346,48	346,48	28,65	28,65	28,65	7385
5	522,4	29,52	29,52	403,64	403,64	403,64	403,64	403,64	29,52	29,52	29,52	10693
6	600,7	31,30	31,30	494,16	494,16	494,16	494,16	494,16	31,30	31,30	31,30	12947



7	611,1	34,55	34,55	543,98	543,98	543,98	543,98	543,98	34,55	34,55	34,55	13192
8	625,2	40,27	40,27	574,34	574,34	574,34	574,34	574,34	40,27	40,27	40,27	16874
9	648,5	49,85	49,85	598,98	598,98	598,98	598,98	598,98	49,85	49,85	49,85	11135
10	657,4	64,47	64,47	620,5	620,5	620,5	620,5	620,5	64,47	64,47	64,47	13169
11	675,3	81,28	81,28	651,98	651,98	651,98	651,98	651,98	81,28	81,28	81,28	11050
12	678,8	93,17	93,17	668,4	668,4	668,4	668,4	668,4	93,17	93,17	93,17	11767
13	682,6	98,23	98,23	682,52	682,52	682,52	682,52	682,52	98,23	98,23	98,23	11272
14	708,2	100,00	100,00	698,16	698,16	698,16	698,16	698,16	100,00	100,00	100,00	10224
15	715,8	106,22	106,22	707,4	707,4	707,4	707,4	707,4	106,22	106,22	106,22	11977
16	724	113,75	113,75	723,52	723,52	723,52	723,52	723,52	113,75	113,75	113,75	10195
17	726,7	122,42	122,42	731,94	731,94	731,94	731,94	731,94	122,42	122,42	122,42	11877
18	742,1	131,93	131,93	745,2	745,2	745,2	745,2	745,2	131,93	131,93	131,93	12664
19	755,5	143,35	143,35	757,98	757,98	757,98	757,98	757,98	143,35	143,35	143,35	13416
20	773,7	157,55	157,55	772,04	772,04	772,04	772,04	772,04	157,55	157,55	157,55	13528
21	779,5	174,95	174,95	780,46	780,46	780,46	780,46	780,46	174,95	174,95	174,95	13281
22	798,6	194,85	194,85	789,16	789,16	789,16	789,16	789,16	194,85	194,85	194,85	14062
23	796	214,75	214,75	799,9	799,9	799,9	799,9	799,9	214,75	214,75	214,75	13376
24	803,9	229,97	229,97	807,76	807,76	807,76	807,76	807,76	229,97	229,97	229,97	14068
25	817,8	243,08	243,08	818,72	818,72	818,72	818,72	818,72	243,08	243,08	243,08	14684
26	814,6	253,88	253,88	822,44	822,44	822,44	822,44	822,44	253,88	253,88	253,88	14392
27	822,8	265,98	265,98	830,42	830,42	830,42	830,42	830,42	265,98	265,98	265,98	1000

## Cap. 5. MODELAREA EXPERIMENTALA A CONDIȚIILOR DE APRINDERE A ELEMENTELOR DE CONSTRUCȚII SUPUSE LA INCENDIU.

### Scopul experimentării

Scopul prezentului studiu îl reprezintă încercarea la foc a unui element de construcție, compus din trei straturi și determinarea timpului de încălzire a materialului până când acesta se degradează fizic, în condițiile unei incinte de probă în care temperatura este progresiv ridicată conform *curbei standard temperatura-timp*. În același timp s-a efectuat modelarea teoretică prin care se determina timpul, respectiv temperatura, la care se ating condițiile convenite de declarare a distrugerii. Rezultă că modelarea are ca scop final **determinarea temperaturii suprafeței interioare și exterioare a probei, funcție de timp.**

### 5.1. Instalația Experimentală

Pentru studiul experimental s-a utilizat o instalație experimentală care răspunde cerințelor impuse de standardele românești în vigoare și anume: SR EN 1363-1: 2001 „Încercări de rezistență la foc. Partea 1: Condiții generale”; SR EN 1363-1: 2001 „Încercări de rezistență la foc. Partea 2: Proceduri alternative și suplimentare”; SR EN 1363-1: 2001 „Condiții de etalonare a cuptorului”.

Instalația experimentală / standul de testare este reprezentată de un cuptor proiectat și realizat să funcționeze cu combustibil gazos și este capabil să încălzească pe o față elementele de separare verticale.

Instalația experimentală s-a realizat în Laboratorul de Cercetare din cadrul Catedrei de Termotehnică, Facultatea de Ingineria Instalațiilor, sub directă îndrumare a doctorandului.

Performanțele instalației experimentale, privind funcționarea ei, în concordanță cu cerințele cuprinse în standardele europene, referitoare la încercări de rezistență la foc, au fost omologate de o comisie formată din specialiști din domeniu (reprezentanți ai ministerului MDRT, reprezentanți ai MI, reprezentanți ai Universității Politehnica din București, reprezentanți ai Facultății de Pompieri și reprezentanți ai UTCB – Colectiv Aparate Termice).

#### Cuptorul și materialele folosite la realizarea lui

Cuptorul are formă rectangulară cu deschiderea de  $L \times l = (3000 \times 3000)$ mm iar adâncimea de  $G=2500$ mm.

Cuptorul are o structură de rezistență realizată din profile metalice, tip: I și U, cu închideri realizate din tablă neagră decapată cu grosimea de 2,50mm, care este prinsă prin sudură și prin șuruburi, de cadrul metalic ce reprezintă structura de rezistență a cuptorului.

La interior, cuptorul este căptușit, pe cinci din cele șase fete, cu saltele din vată ceramică cu grosimea de 50mm, având densitatea mai mică de  $1000\text{kg/m}^3$  (cerința impusă de standard), aceasta constituind minim 70% din suprafața interioară expusă a cuptorului.

Vatra cuptorului este realizată din beton refractar cu densitatea sub  $1000 \text{ Kg/m}^3$ , cu grosimea de 150 mm și căptușită cu saltea din vată ceramică cu grosimea de 50 mm.



Figura 5.1. Vedere frontala a standului de testare.

Grosimea totala a izolației de 250 mm, a celor cinci pereți, a rezultat in urma condițiilor impuse inițiale de proiectare, respectiv temperatura maxima admisă pe fata exterioară a cuptorului să fie de maximum  $40^\circ\text{C}$ .

Perețele frontal al cuptorului, denumit și perete suport pentru proba de testat are grosimea de 250mm și este realizat din BCA.

Caracteristicile termo fizice a materialelor utilizate la realizarea cuptorului sunt prezentate in tabelele de mai jos:

Tabel 5.1. Proprietățile materialului izolator - vată ceramică.

Temperatura, T [ $^\circ\text{C}$ ]	Densitatea, $\rho$ [ $\text{kg/m}^3$ ]	Conductivitatea termica, $\lambda$ [ $\text{W/mK}$ ]	Căldura specifica, $c_p$ [ $\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ ]	Temperatura de clasificare [ $^\circ\text{C}$ ]
400	65	0,09	1,14	1260
600	100	0,12	1,14	1260
800	130	0,18	1,14	1260
1000	160	0,28	1,14	1260

Peretele frontal al cuptorului denumit si peretele suport este realizat din BCA cu grosimea de 50mm, cu caracteristicile termo-fizice, prezentate in tabelul 5.2.

Tabel 5.2. Proprietățile BCA-ului.

Temperatura, T [°C]	Densitatea, $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductivitatea termica, $\lambda$ [W/mK]	Căldura specifică, $c_p$ [kJ/kg*K]
-	525	0,135	-

In figurile 5.2 si 5.3 este prezentat sistemul de prindere a vatei ceramice, prin intermediul ancorelor sudate de mantaua din tabla neagra. Sunt montate 5 straturi de vata ceramica refractara, care este rigidizata de mantaua cuptorului prin intermediul unor cleme de prindere. Atât tijele cat și clemele sunt rezistente la temperaturi înalte, de pana la 1500°C.



Figura 5.2. Distribuția tijelor de prindere a materialului izolator (vata ceramica).



Figura 5.3. Modul de prindere a vatei ceramice.

Pe una din părțile laterale a cuptorului sunt prevăzute trei orificii și sunt poziționate echidistant pe verticală astfel încât să se poată introduce sonda de măsurare a diferențelor de presiune statică, între presiunea din interiorul cuptorului și presiunea mediului ambiant la aceeași înălțime.

#### **Panoul frontal de etalonare a cuptorului.**

Peretele frontal este realizat din beton refractar cu densitatea sub 1000 Kg/mc, având o grosime de 200mm.

Peretele este prevăzut cu cinci capace metalice (tip sandwich: placa metalică la interior; izolație din vată ceramică cu grosimea de 50mm; placa metalică la exterior), conform SR EN 1363-1. În fiecare capac sunt montați doi senzori de temperatură. Aceste capace sunt necesare pentru calibrarea funcționării cuptorului după curba teoretică temperatură / timp, impusă de același standard menționat mai sus.



Figura 5.4. Panoul frontal de etalonare cu cele 5 puncte de măsură.

În figura de mai jos este prezentată construcția pentru un element de măsurare.

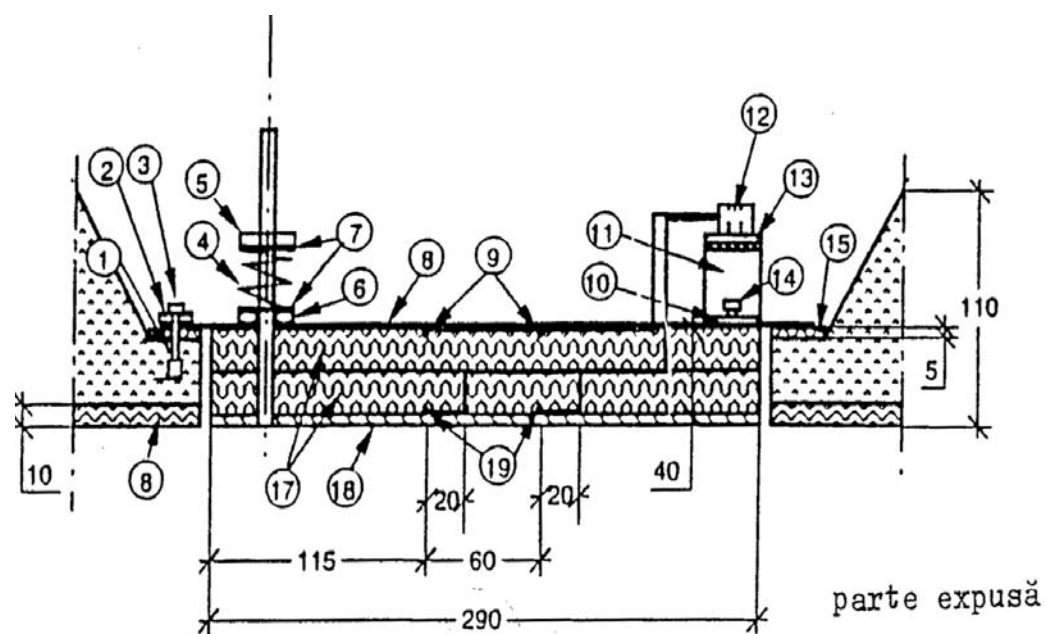


Figura 5.5. Elemente componente a unui element de măsurare.

Dispozitivul de măsurare este prevăzut pentru măsurarea expunerii termice în cuptor, cu scopul etalonării cuptorului, în vederea determinării rezistenței la foc. Pe acest dispozitiv sunt montate central la o distanță de 30mm față de ax, două termocuple ce au rol de a monitoriza variațiile de temperatură pe pereții interiori ai cuptorului.

Acest element este realizat din două straturi de vată minerală cu grosimea de 100mm, rezistentă la temperaturi înalte de 1200°C, așezate între două plăci: o placă din oțel inoxidabil cu grosimea de 2mm și o a doua placă cu grosimea de 10mm. Acest ansamblu de tip sandwich are dimensiuni nominale de 290 x 290 x 40mm.

Placa mai subțire de oțel este expusă la foc și este din oțel inoxidabil fiind sudate în colțuri patru șuruburi de prindere M8x60 mm. Aceste șuruburi străpung cea de-a doua placă de oțel, realizând strângerea celor două, până când se obține grosimea peretelui impusă de standard.

#### Arzătoare. Alimentarea cu combustibil gazos

Alimentarea cu combustibil gazos a cuptorului se realizează prin intermediul unui racord de gaz cu diametrul DN40, debitul de alimentare este de  $Q = 40 \text{ Nm}^3/\text{h}$  și presiunea  $P_{\text{max}} = 1 \text{ bar}$ .

Pe conducta de alimentare, după contorul de gaz, sunt montate următoarele echipamente:

- robinet cu bila pentru siguranța, DN 40;
- robinet cu bila de manevra, DN 40;
- manometru, pentru a monitoriza presiunea de alimentare;
- filtru Y, DN 40;
- electro - vană de siguranță, DN 40;

- regulator de presiune gaz, DN 40;
- vana de eșapare, DN 25;
- manometru cu prize de presiune, DN 18;
- regulator raport aer-gaz;
- distribuitor de gaz, DN 100;
- conducte de legătura dintre distribuitor și arzătoare, DN 20;
- rampa de gaz pentru fiecare arzător, prevăzută cu electrovalvă;
- arzătoare cu debit maxim:  $Q_{\max} = 11.00 \text{ Nm}^3/\text{h}$ .

Cuptorul este prevăzut cu patru arzătoare cu posibilitatea modularii puterii termice, având puterea de max. 100kW, pentru fiecare arzător în parte. Acestea sunt montate pe lateralele cuptorului, în oglindă, astfel încât jetul flecarilor să nu bată pe aceeași direcție. Fiecare arzător este prevăzut cu rampa de alimentare cu combustibil gazos (2 robinete cu bila, racord flexibil, electrovalvă) și racord de aer. Schema de alimentare cu combustibil gazos și aer este prezentată în figura 5.6.

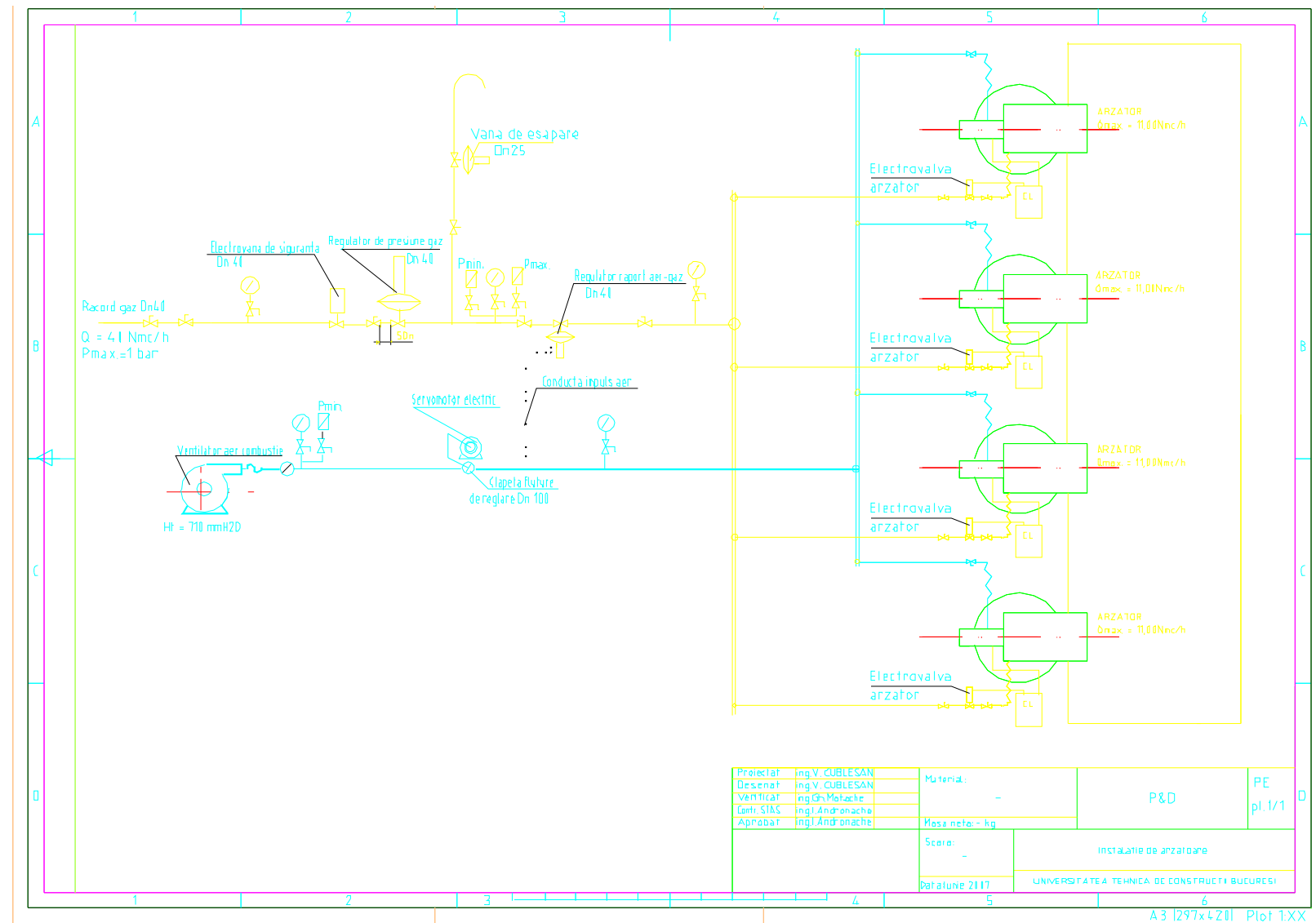


Fig. 5.6. Schema de alimentare cu combustibil gazos si aer



Rampa de alimentare cu aer este compusa din următoarele echipamente:

- ventilator combustie aer,  $H = 710 \text{ mmH}_2\text{O}$ ;
- racord flexibil, DN 100;
- manometru cu priza de presiune;
- servomotor electric – clapeta de reglare tip fluture, DN 100;
- conducta impuls aer;
- manometru;
- distribuitor aer, DN 100;
- racorduri flexibile, DN 50.

Arzătoarele sunt prevăzute cu cate un panou electric de funcționare automatizata. Toate cele patru tablouri sunt conectate la un tablou general de alimentare cu energie electrica si de automatizare. Acesta este programat sa comande funcționarea arzătoarelor pentru realizarea atmosferei controlate in interiorul cuptorului, așa cum poate fi observat in figura 5.7.



Fig. 5.7. Amplasarea arzătoarelor si a panourilor de automatizare aferente fiecărui arzător.

În figura 5.8. este prezentat tabloul general de alimentare cu energie electrică a laboratorului (stânga) și al tabloului de automatizare (dreapta). Prin intermediul tabloului de automatizare sunt controlate arzătoarele, suflanta de aer pentru amestecul de combustie la arzătoare, supapele de siguranță, electrovanele și senzorii de presiune diferențială. Tot odată este prevăzut cu un automat programabil în 17 pași pentru realizarea condițiilor de funcționare și software-ul pentru achiziția și prelucrarea datelor. Pe panoul frontal se pot citi temperaturile și timpul, urmând să fie dotat cu un calculator tip panou cu ecran tactil.



Fig. 5.8. Tabloul general de alimentare și tabloul de automatizare.

### Sistemul de evacuare a gazelor rezultate in urma procesului de ardere

Sistemul de evacuare a gazelor rezultate in urma procesului de ardere din cuptor, este realizat din doua coșuri cu diametrul de  $\varnothing 600\text{mm}$ . Acestea sunt prevăzute cu rupere de presiune, pentru a raci gazele arse, pentru a obține temperaturi mai scăzute la ieșirea in atmosfera.

Coșurile sunt prevăzute cu „pălării”, cu diametrul de  $\varnothing 850\text{mm}$  pentru a putea capta un debit de aer (din laborator) suficient cat sa răcească gazele arse in jurul valorii de  $200^{\circ}\text{C}$ , vezi figura 5.9.

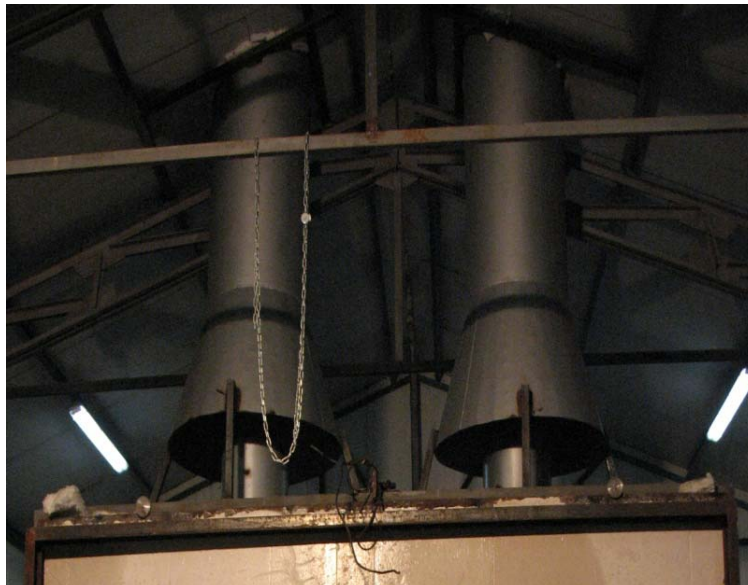


Figura 5.9. Sistemul de evacuare a gazelor arse.

Pe traseul de evacuare a gazelor rezultate in urma procesului de ardere, sunt prevăzute, conform standardului, prize pentru prelevare a gazelor, in vederea efectuării analizei lor. Gazele prelevate sunt aduse la un analizor de gaze tip Affriso – Maxilizzer (asa cum se fi observat in figura 5.10.), care este capabil sa furnizeze informații referitoare la: coeficientul de exces de aer si compoziția gazelor. In același timp aparatul oferă informații referitoare la temperatura gazelor de ardere si a randamentului.



Fig. 5.10. Sistem de măsurare a gazelor rezultate in urma procesului de ardere.

## 5.2. Condiții de Etalonare

### Temperatura cuptorului. Curba de încălzire

Temperatura medie a cuptorului dedusă din citirile termocuplurilor este monitorizată și controlată astfel încât să urmărească relația de mai jos:

$$T = 345 \log_{10} (8 t + 1) + 20$$

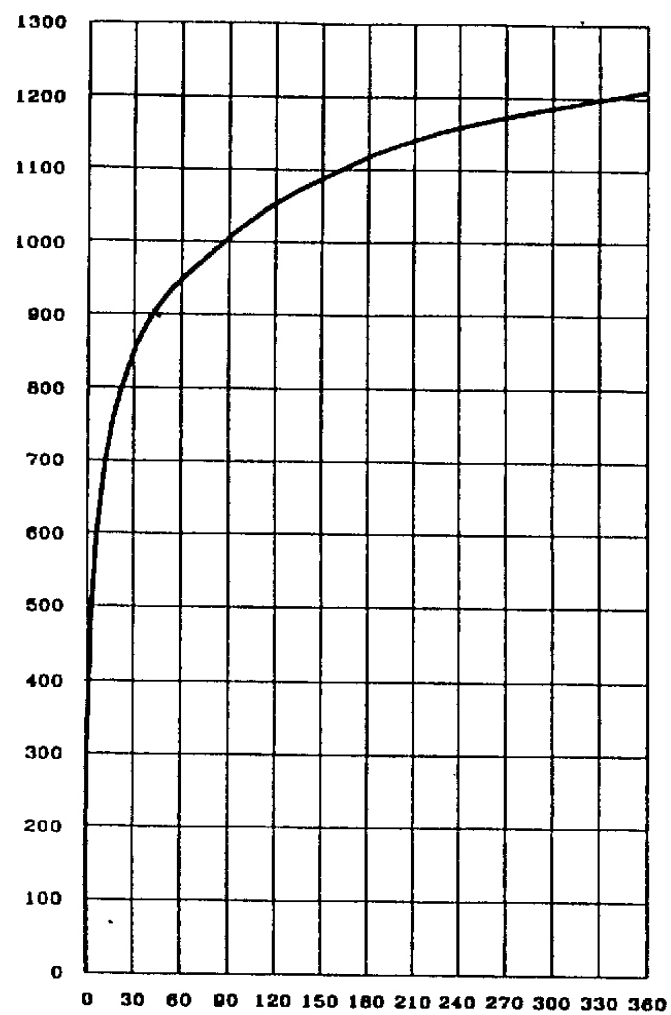
unde:

T – temperatura medie în cuptor, exprimată în grade Celsius;

t – timpul, exprimat în minute.

Tabelul 5.3. Valorile de trasare a curbei Figura 5.11. Curba standard temperatură/timp. standard temperatură / timp.

Timp (minute)	Temperatura în cuptor (°C)
0	20
5	576
10	678
15	738
20	781
30	842
45	902
60	945
90	1006
120	1049
150	1082
180	1110
210	1133
240	1153
300	1186
360	1214



Pentru determinarea variației de temperatură în interiorul și pe perețele cuptorului sunt utilizate termocupluri cu joncțiunea de măsurare (sudură caldă) din fire de nichel crom nichel (Ni-NiCr), aluminiu de tip K, în număr de 5 după cum urmează:

- Trei termocuple sunt poziționate în interiorul cuptorului, pe verticală la o distanță de 100mm față de perete, necesare la determinarea variației temperaturii în cuptor;
- Două termocuple sunt poziționate pe perețele de măsurare pentru a determina variația temperaturii pe perete.

#### **Termocupluri pe suprafața neexpusă.**

Temperatura suprafeței neexpuse a probei se măsoară cu ajutorul termocuplelor tip disc. Pentru a realiza un contact termic bun, firele tip K ale termocuplelor, sunt lipite cu suduri calde pe un disc de aramă cu grosimea de 0.2mm și 12mm diametru.

Firele termocuplurilor sunt acoperite cu o izolație anorganică izolatoare de  $(30 \pm 0.5)$ mm x  $(30 \pm 0.5)$ mm x  $(2.0 \pm 0.5)$  mm grosime.

Materialul căptușelii are densitatea de  $(900 \pm 100)$ Kg/m<sup>3</sup>. Izolația este îndepărtată pentru a potrivi firele termocuplurilor.

#### **Termocupluri mobile.**

Unul sau mai multe termocupluri vor măsura temperatura suprafeței neexpuse în timpul încercării, în poziții unde se preconizează temperaturi mari. Joncțiunile de măsurare ale termocuplurilor vor consta din fire tip K, în diametru de 1.0mm lipite sau sudate pe un disc din aramă cu diametru de 12mm, grosimea fiind de 0.5mm. Ansamblu termocuplelor vor fi prevăzute cu un mâner astfel încât să poată fi aplicat în orice punct al suprafeței neexpuse a probei.

#### **Termocupluri pentru temperatura ambientală.**

Pentru măsurare temperaturii ambientală este folosit un termocuplu pentru a indica temperatura în interiorul laboratorului, în vecinătatea cuptorului, înainte de începerea încercărilor și pe tot parcursul încercărilor, până la finalizarea acestora. Termocuplul are 3mm diametru, izolat mineral, termocuplu tip K în teacă de oțel inoxidabil. Joncțiunea de măsurat va fi protejată de căldura radiantă și de curenți.

Toate termocuplurile ce vor fi utilizate sunt etalonate de către un laborator de etalonare autorizat, pentru a se evita eventualele erori ce pot intervenii în timpul testărilor.

#### **Toleranțe, impuse de standard.**

Deviația procentuală a ariei curbei de temperatură medie înregistrată de termocuplurile din cuptor specificate, în raport cu timpul din aria curbei standard temperatură / timp trebuie să fie în limite, după cum urmează:

a)	15%	pentru	$5 < t \leq 10$
b)	$[15 - 0.5(t - 10)]\%$	pentru	$10 < t \leq 30$
c)	$[5 - 0.083(t - 10)]\%$	pentru	$30 < t \leq 60$
d)	2.5%	pentru	$t > 60$

unde:

$$d_e = \frac{A - A_s}{A_s} \cdot 100 \text{ [%]}$$

$d_e$  – deviația procentuală, [%];

$A$  – aria situată sub curba reală temperatură / timp în cuptor, [m<sup>2</sup>];

$A_s$  – aria situată sub curba standard temperatură / timp, [m<sup>2</sup>];

$t$  – timpul, [min.].

Toate ariile sunt calculate cu aceeași metodă, adică prin însumarea ariilor la intervale de timp care să nu depășească 1 minut și vor fi calculate din momentul zero.

În orice moment după 10 minute ale încercării, temperatura înregistrată de orice termocuplu din cuptor nu este diferită de corespondența sa din curba standard temperatură / timp cu mai mult de 100 °C, pentru epruvetele care ard rapid, dovedindu-se că această deviație este clar identificată ca fiind asociată cu aprinderea bruscă a unei cantități semnificative de materiale combustibile, ducând astfel la creșterea temperaturii în cuptor.

Ca o consecință a creșterii rapide a temperaturii în primele 5 minute ale încercării, pot exista dificultăți în a controla cuptorul astfel încât după această perioadă pot fi atinse toleranțele pentru conformarea cu curba temperatură / timp. Furnizarea de informații adiționale ajută la evitarea acestei probleme, unul sau mai multe tipuri de termocupluri convenționale putând fi utilizate în furnizarea unor date suplimentare în scopul controlării cuptorului.

În tabelul de mai jos (tabelul 5.4) sunt prezentate valorile temperaturilor din interiorul cuptorului și deviațiile (abaterele) calculate, acceptate de standard, după care trebuie să funcționeze cuptorul de testare.

Tabel 5.4. Deviațiile temperaturilor înregistrate față de valorile curbei standard temperatură/timp.

Timp [min]	Temperatura [°C]	Deviația maximă [°C]	Deviația minimă [°C]
0	20	23	17
5	576	662.4	489.6
10	678	779.7	576.3
15	738	830.25	645.75
20	781	859.1	702.9
30	842	884.1	799.9
45	902	935.87	868.13
60	945	968.72	921.28
90	1006	1031.15	980.85
120	1049	1075.225	1022.77
150	1082	1109.05	1054.95
180	1110	1137.75	1082.25
210	1133	1161.325	1104.67
240	1153	1181.825	1124.15
300	1186	1215.65	1156.35
360	1214	1244.35	1183.65

Din tabelul 5.4 se poate observa că temperatura crește de la valoarea de 20°C la valoarea de 1214 °C, în intervalul de timp 0 – 360 minute. În primele cinci minute creșterea de temperatură este foarte bruscă, după care această creștere este mai lentă, cu o rată de aproximativ 50 °C, într-un interval de timp de 30 minute. În intervalul de timp min. 10 - min 30, sunt acceptate deviații mai mari ale temperaturii gazelor de ardere din cuptor, față de deviațiile aferente intervalului de timp min.30 - min. 300 (cca. 90 °C, față de 28°C).

Reprezentarea grafică a curbei teoretice de temperatură, precum și abaterile minime și maxime acceptate față de aceasta sunt ilustrate în figura 5.12.

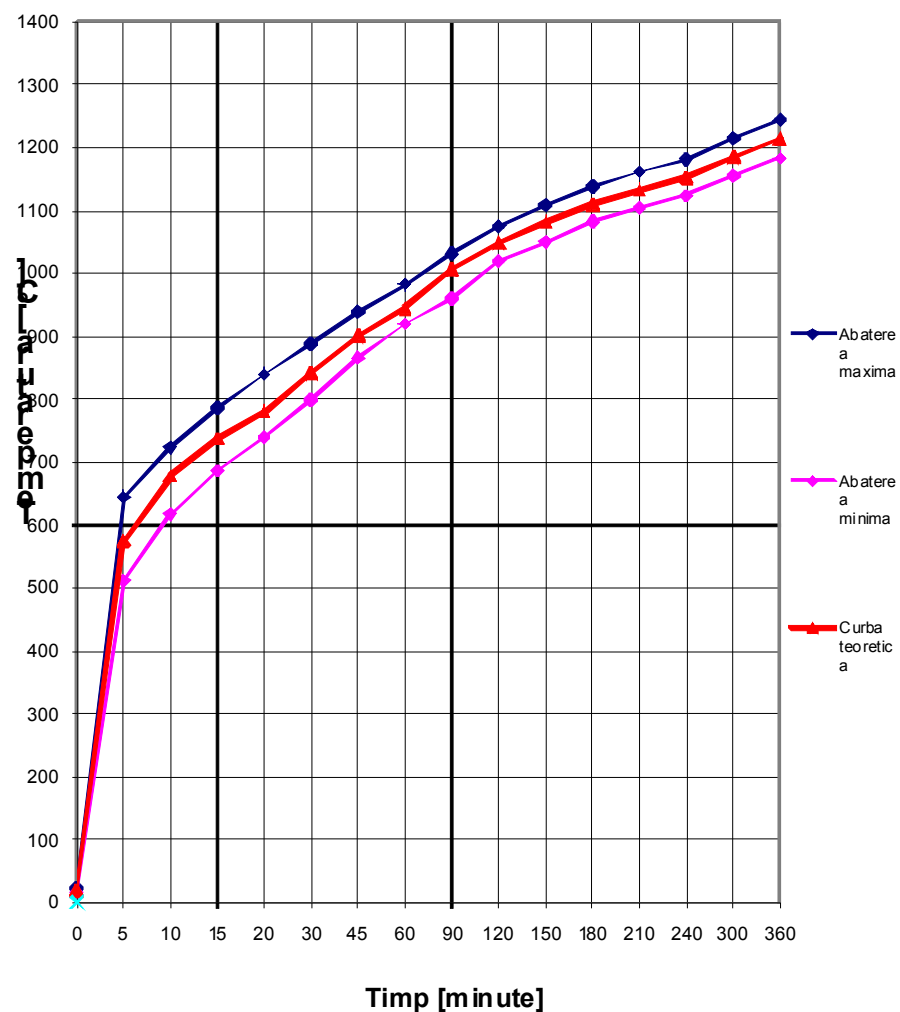


Figura 5.12. Graficul cu abaterile de la curba standard temperatura / timp.

#### **Presiunea în Cuptor. Distribuția presiunii pe înălțimea cuptorului.**

Distribuția presiunii pe înălțimea cuptorului este influențată în principal de către efectul ascensional al gazelor. În scopul controlării presiunii se poate presupune că gradientul presiunii va fi maxim 8.5 Pa pe metru de înălțime.

Sistemul de măsurare a presiunii este realizat astfel încât să neglijeze fluctuațiile rapide ale presiunii (de exemplu cicluri de 1 secundă sau mai puțin) asociate cu turbulențe.

Presiunea în cuptor este raportată la presiunea din exteriorul cuptorului, la o înălțime egală.

Presiunea în interiorul cuptorului este monitorizată și controlată astfel încât la 5 minute de la începerea încercării să fie de  $\pm 5$  Pa față de presiunea specificată pentru elementul respectiv încercat, iar în continuare la 10 minute să fie de  $\pm 3$  Pa față de presiunea specificată pentru elementul respectiv încercat.

Abaterea de la presiunea măsurată la distribuția de referință se calculează cu formula de mai jos și nu trebuie să depășească 2 Pa, pentru nici una dintre poziții.

$$\Delta p = \frac{353}{T} \cdot g \cdot \Delta y, [\text{Pa}] \quad (5.1.)$$

unde:

T - Temperatura absolută din interiorul cuptorului (media temperaturilor din cuptor), [K];

g - accelerația gravitațională, cu valoarea de:  $9,81\text{m/s}^2$ ;

$\Delta y$  - diferența de nivel dintre locul stabilit al sondei și locul de măsurare a celei mai mari presiuni statice, [m].

#### **Stabilirea planului de presiune neutră.**

Cuptorul funcționează astfel încât planul de presiune neutră (presiunea zero) se stabilește la 500mm deasupra unui nivel imaginar al pardoselii. Indiferent de această, presiunea la partea superioară a epruvetei nu trebuie să depășească în nici un moment 20Pa și această cerință poate rezulta în ajustarea înălțimii planului de presiune neutră.

#### **Atmosfera în cuptor.**

Raportul combustibil / aer din cuptor și introducerea oricărui aer secundar sau fals sunt stabilite astfel încât să furnizeze un conținut de minim 4% oxigen atmosferei cuptorului atunci când se încarcă epruvetele fără materiale combustibile. Această setare a arzătoarelor pentru un raport combustibil / aer incluzând orice setare pentru introducerea aerului secundar nu este modificată după ultima verificare a performanțelor cuptorului.

Cuptorul trebuie prevăzut cu o sondă de analiză a gazelor, introdusă într-un loc în care compoziția gazelor este reprezentativă pentru mediul din cuptor. În cazul cuptoarelor verticale (cum este și cazul nostru) sonda trebuie amplasată în mijlocul înălțimii, la  $(100 \pm 50)\text{mm}$  de fața expusă a construcției supusă încercări.



Trebuie evitate măsurările efectuate direct în zona de combustie a arzătoarelor, lângă ieșirile de aer secundare, în vecinătatea elementelor de măsurare sau în apropierea evacuării gazelor de ardere.

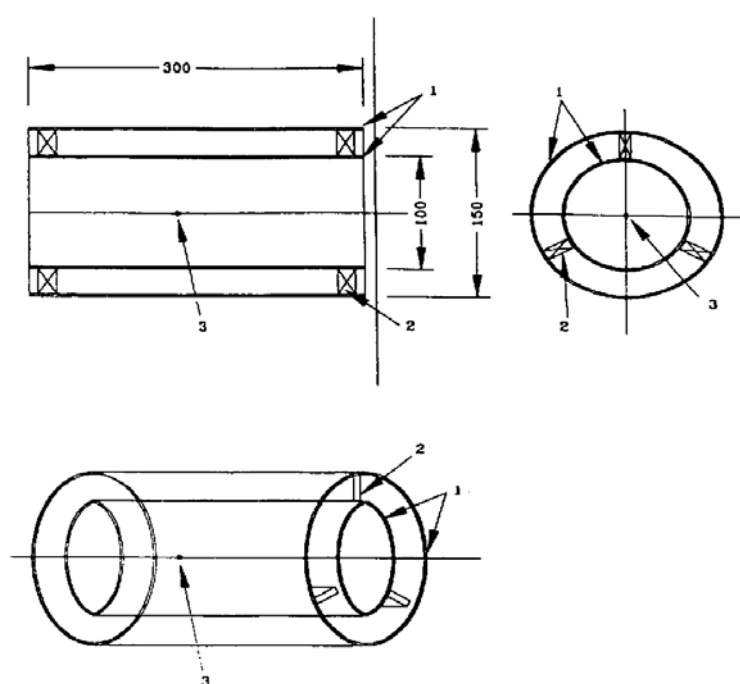
Senzorul și aparatura de culegere de date trebuie să fie conform următoarelor cerințe:

Eroare de măsurare:	<0.5% O <sub>2</sub> ;
Constanta de timp:	<30 s;
Domeniul de măsurare:	1 la 10 % O <sub>2</sub> .

#### Condiții de Temperatură Ambientală.

Temperatura mediului ambiant (temperatura aerului din laborator) va fi ( 20 ± 10 )°C la începerea încercărilor și va fi monitorizată la o distanță cuprinsă între 1m și 3m pe orizontală de la fața neexpusă, în asemenea condiții încât senzorul să nu fie afectat de radiația termică emisă de construcția de încercat și / sau cuptor.

În figura de mai jos este prezentat un dispozitiv adecvat compus din două țevi de plastic concentrice de 300mm lungime și diametrul nominal de 100mm respectiv 150mm sunt arătate în figura de mai jos.



#### Legendă:

1. Tuburi concentrice;
2. Distanțier;
3. Poziția instrumentului de măsură a temperaturii ambientale.

Figura 5.13. Instrumentul de măsură a temperaturii ambientale.

În timpul încercării temperatura în laborator nu trebuie să scadă cu mai mult de 5°C sau nu trebuie să crească cu mai mult de 20°C pentru toate elementele de separație izolate, atâta timp cât sunt încă satisfăcute criteriile de izolare termică.

### 5.3. Proba de încercat

Studiul experimental s-a realizat pe un element de construcție, perete neomogen, compus din trei straturi, montat pe peretele suport al cuptorului.

Elementul de construcție testat, denumit în continuare: „*proba de testare*” este de formă rectangulară compusă din 3 straturi, simulând o ușă, așa cum este prezentat în figura 5.14:

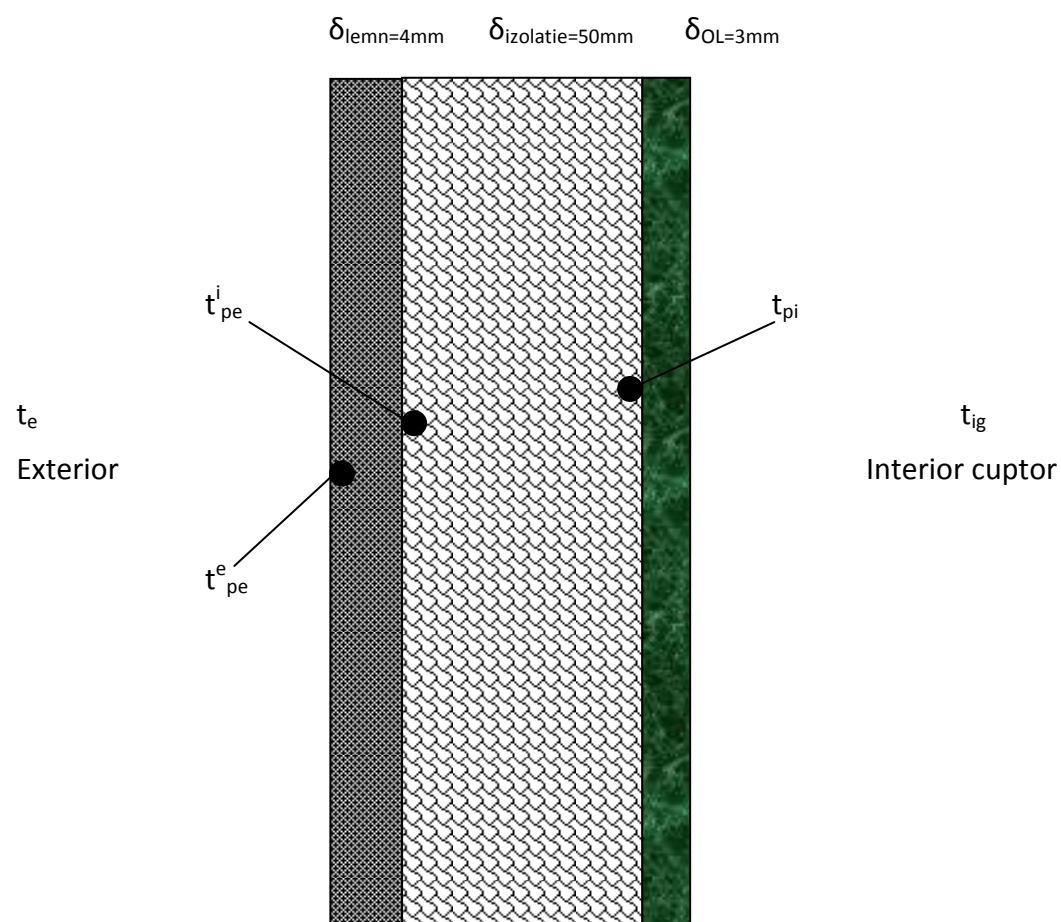


Fig. 5.14. Vederea în secțiune a elementului de testat.

#### Legendă:

$t_{ig}$  - temperatura gazelor din interiorul cuptorului, [°C];

$t_{p\ spate\ 1}$  - temperatura măsurată pe peretele opus peretelui suport, (termocuplele:  $t_{p\ spate\ 1}$ ,  $t_{p\ spate\ 2}$ ,  $t_{p\ spate\ 3}$ ,  $t_{p\ spate\ 4}$ ,  $t_{p\ spate\ 5}$ ,  $t_{p\ spate\ 6}$ ), [°C];

$t_{pi}$  - temperatura pe suprafața plăcii metalice, la interfața dintre placa și stratul de vată minerală, (termocuplele:  $t_{pi1}$ ,  $t_{pi2}$ ,  $t_{pi3}$ ,  $t_{pi4}$ ,  $t_{pi5}$ ,  $t_{pi6}$ ), [°C];

$t_{pe}^i$  - temperatura pe suprafața plăcii din lemn, la interfața dintre placa și stratul de vată minerală, (termocuplele:  $t_{pe1}$ ,  $t_{pe2}$ ,  $t_{pe3}$ ,  $t_{pe4}$ ,  $t_{pe5}$ ,  $t_{pe6}$ ), [°C];

$t_{pe}^e$  - temperatura pe suprafața exterioară a plăcii din lemn, la interfața dintre placă și aerul ambiant, (termocuplele:  $t_{pfe1}, t_{pfe2}, t_{pfe3}, t_{pfe4}, t_{pfe5}, t_{pfe6}$ ), [°C];

$t_e$  - temperatura aerului din laborator. Aceasta trebuie să rămână constantă pe tot parcursul încercărilor / testării și anume nu trebuie să depășească valoarea de  $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  sau să nu depășească temperatura înregistrată înainte de începerea testului  $\pm 2\text{ °C}$ , [°C].

Grosimile celor trei straturi componente ale probei de testat sunt de 3mm, 50 mm, respectiv 4mm, așa cum poate fi observat și din figura 5.14.

Admițând că cele trei straturi pot fi asimilate cu planuri paralele infinite, variația temperaturii în pereți este una liniară, cu pante diferite funcție de caracteristicile termofizice ale straturilor. Variația calitativă a temperaturii în straturile probei de testare, este reprezentată în figura 5.15.

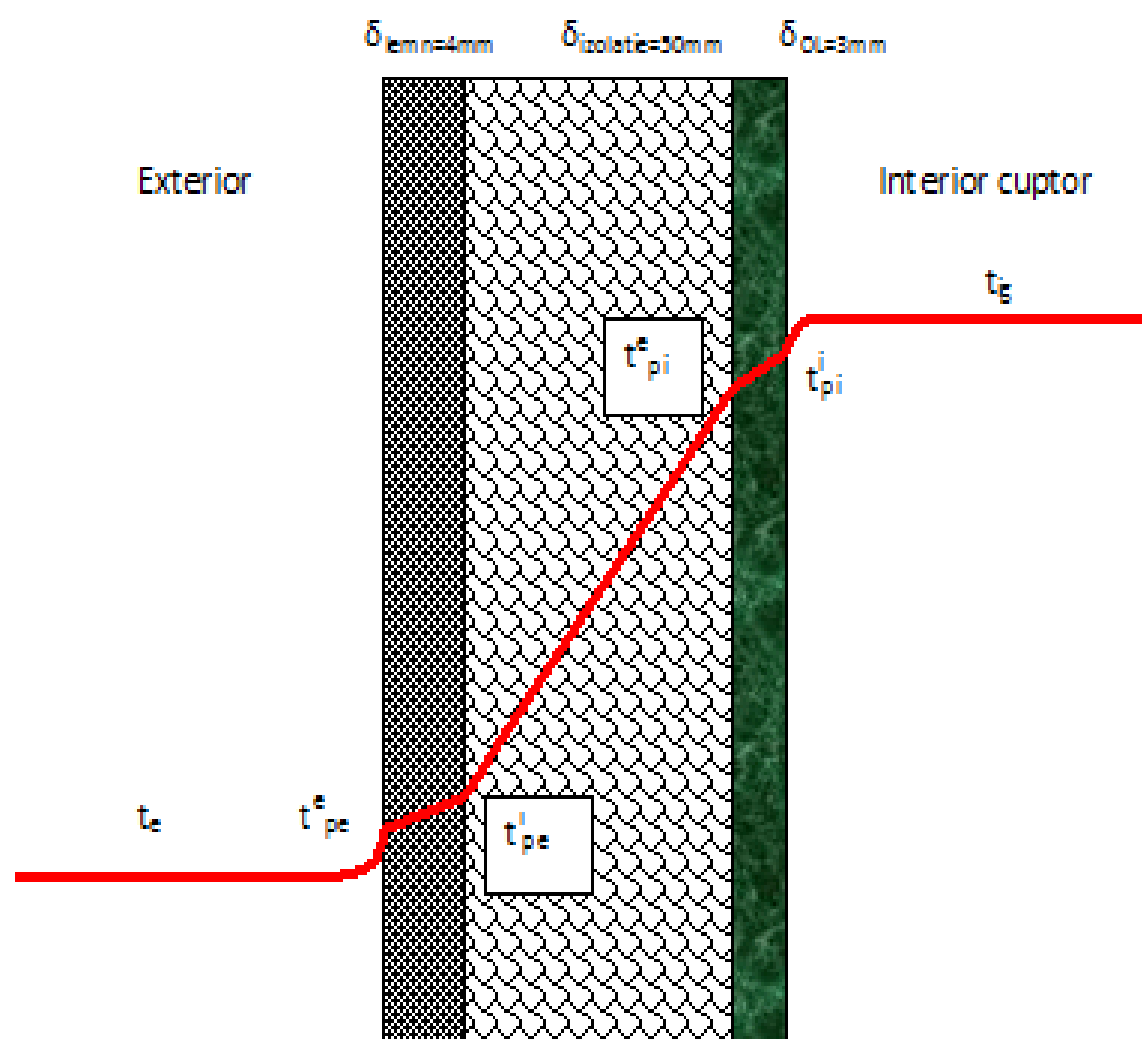


Fig. 5.15. Variația calitativă a temperaturii în proba de testare.

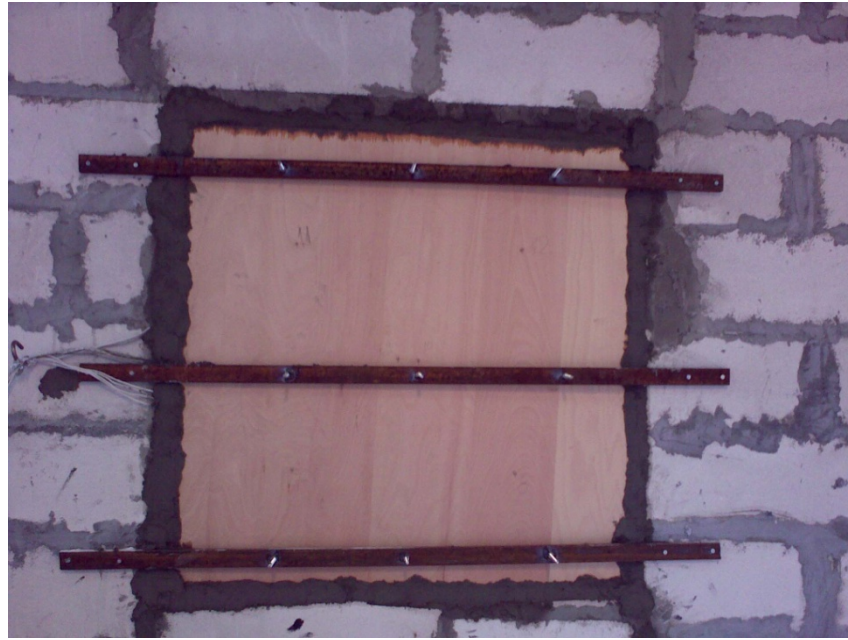


Fig. 5.16. Amplasarea probei de testare, pe peretele suport.

In figura 5.17. poate fi observat modul de amplasare a primului strat component a probei de testat, care se afla la interiorul cuptorului. Acesta este o placa metalica (din tabla neagra) cu dimensiunile de gabarit  $L \times l = (0,110 \times 0,115)$  m, având o grosime de 3mm.

Tot in figura 5.17. se poate observa numărul (cinci senzori) si modul de amplasare a senzorilor de măsurarea a temperaturii, pe placa metalică.



Fig. 5.17. Amplasarea senzorilor pe placa metalică.

Tabel 5.5. Proprietățile termo - fizice pentru primul strat.

Temperatura, T	Densitatea, $\rho$	Conductivitatea termica, $\lambda$	Căldura specifica, $c_p$
[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/m*K]	[kJ/kg*K]
-	7850	43	0,63

Cel de al doilea strat component al probei de testare este realizat din vata minerala cu dimensiunile de gabarit L x l = (0,110 x 0,115) m si grosimea de 50 mm.



Fig. 5.18. Vata minerala, reprezentând al doilea strat.

Tabel 5.6. Proprietățile termo-fazice pentru al doilea strat.

Temperatura	Densitatea	Conductivitatea termica	Căldura specifica
T	$\rho$	$\lambda$	$c_p$
[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[kJ/kg*K]
-	200	0,04	-

Cel de-al treilea strat, component al probei de testare este realizat dintr-o placa din fibre de lemn, tip PFL, cu dimensiunile de gabarit L x l = (0,110 x 0,115) m, cu grosimea de 4 mm. Fixarea probei de testare pe peretele suport s-a realizat cu ajutorul a trei profile metalice, prin intermediul unor șuruburi, așa cum se poate observa in figura 5.19.



Fig. 5.19. Placa de lemn (PFL), reprezentând al doilea strat, stratul exterior.

Tabel 5.7. Proprietățile termo-fazice pentru al treilea strat.

Temperatura, T	Densitatea, $\rho$	Conductivitatea termica, $\lambda$	Căldura specifica, $c_p$
[°C]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[W/mK]	[kJ/kg*K]
-	200	0,047	-

#### 5.4. Parametrii măsurați

În prezentul studiu experimental s-au măsurat următorii parametri:

- temperatura aerului exterior din laborator;
- temperatura gazelor de ardere din interiorul cuptorului;
- temperatura măsurată pe fețele pereților interiori;
- temperatura pe suprafața plăcii metalice, la interfața dintre placa și stratul de vată minerală;
- temperatura pe suprafața plăcii din lemn, la interfața dintre placa și stratul de vată minerală;
- temperatura pe suprafața exterioară a plăcii din lemn, la interfața dintre placa și aerul ambiant.
- debitul de combustibil consumat pe parcursul încercărilor;
- analiza gazelor rezultate în urma arderii combustibilului;
- intervalul de timp scurs între pornirea testului, până la distrugerea probei (oprirea testului).

### 5.5. Metodologia de calcul

#### Obiective pentru modelul de calcul.

Pe baza temperaturilor măsurate s-a determinat prin calcul fluxul de căldură transmis probei supuse testării. Fluxul de căldură primit de proba de testare se compune din:

- $\dot{Q}_{ac}$  - fluxul de căldură acumulat de pereții incintei și probei de testare, [W];
- $\dot{Q}_r$  - flux de căldură transmis prin radiație de către pereții cuptorului (cinci pereți), [W];
- $\dot{Q}_{gr}$  - fluxul de căldură transmis prin radiație de către gazele de ardere, [W];
- $\dot{Q}_{cvi}$  - fluxul de căldură transmis prin convecție, de la gazele de ardere către proba de testare, [W], care pentru prezentul studiu experimental este neglijat;
- $\dot{Q}_{cv}$  - fluxul de căldură transmis prin convecție, mediului exterior: [W].

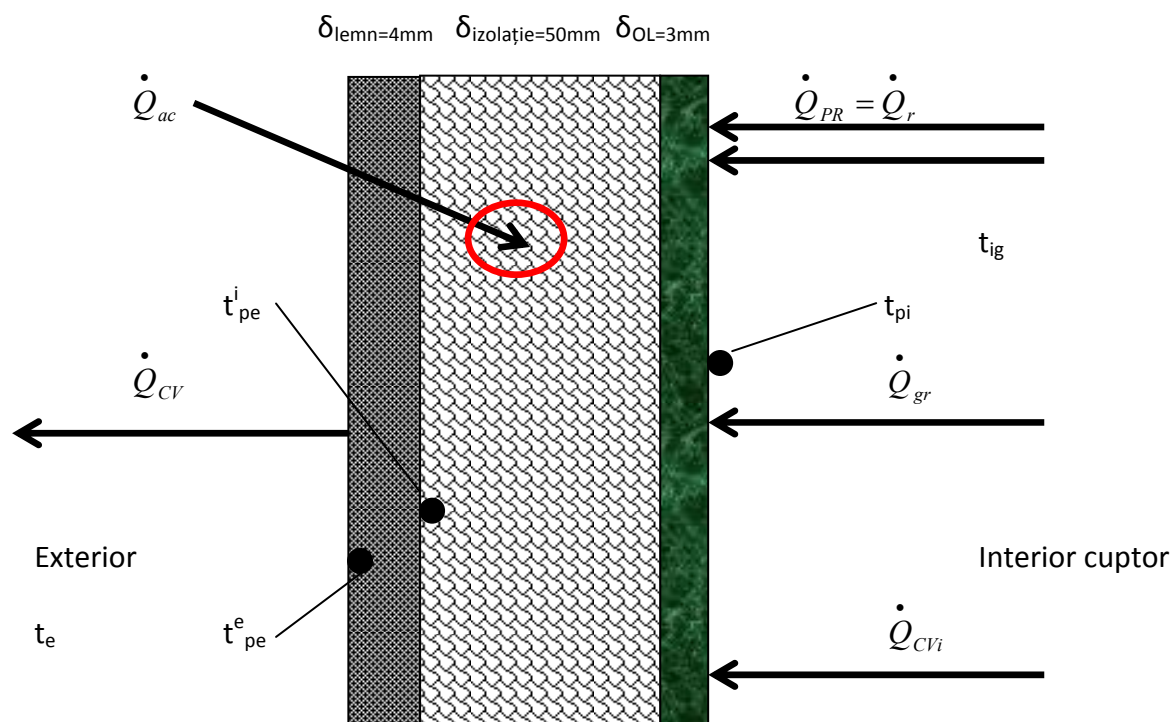


Fig. 5.20. Vederea în secțiunea probei de testare.

Valorile fluxurilor experimentale, determinate prin calcul cu date măsurate, sunt considerate valori de încredere, urmare a închiderii bilanțului, energiilor schimbate între incinta încălzită și proba de testare, precum și bilanțul între acestea și mediul exterior, conform relației 5.2.

$$\dot{Q}_{comb.gaz} = \underbrace{\dot{Q}_{ac} + \dot{Q}_{gr} + \dot{Q}_{g\cos} + \dot{Q}_{pierderipereti}}_{Bilant\ 1} = \underbrace{\dot{Q}_r + \dot{Q}_{gr} + \dot{Q}_{cvi}}_{Bilant\ 2} = \underbrace{(\dot{Q}_{ac} + \dot{Q}_{cv})}_{Bilant\ 3} \quad (5.2)$$

### 5.5.1. Fluxul de căldură acumulat de pereții incintei și a probei de testare

Fluxul de căldură acumulat în materialele pereților și a probei, trebuie cuprins în bilanțul momentan al cuptorului ca fiind fluxul de căldură de încălzire a materialului „i”, integrat pe intervalul de timp în care s-a discretizat calculul:

$$\dot{Q}_{ac} = (V_i * \rho_i * c_{pi}) * \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{\Delta T} * d\tau \quad (5.3)$$

fiind intervale mici de timp  $d\tau$  se poate aproxima cu relația:

$$\dot{Q}_{ac} = (V_i * \rho_i * c_{pi}) * (T_2 - T_1) * \frac{1}{\Delta \tau} \quad (5.4)$$

în care:

-  $(T_2 - T_1)$  sunt limitele intervalului de temperatura calculat ca și creștere între două bilanțuri consecutive, [K];

-  $V_i$  – volumul elementului “i” de construcție, cu  $i = 1$  până la 6;

-  $\rho_i$  – densitatea materialului, elementului de construcție “i”, [kg/m<sup>3</sup>];

-  $c_{pi}$  – căldura specifică a materialului din care este alcătuit elementul de construcție “i”, [kJ/kg\*K];

Căldura acumulată în pereții cuptorului și a probei, pe perioada încălzirii, se determină după cum urmează:

$$Q_{ac} = Q_{vata\ ceramic\ a}^{cuptor} + Q_{TABLA}^{cuptor} + Q_{tabla}^{proba} + Q_{vata\ min\ erala}^{proba} + Q_{lemn}^{proba}, [J] \quad (5.4)$$

$$Q_{ac} = \sum_{i=1}^n \rho_i * V_i * c_{pi} * \Delta T, [J] \quad (5.6)$$

$$V_{vata\ ceramic\ a}^{cuptor} = 3 * 4 * 3 + 2 * 2.5 * 3 = 51 * 0.25 = 12.434 m^3$$

$$V_{tabla}^{cuptor} = 51 * \delta_{tabla} = 51 * 0.025 = 1.244 m^3$$

$$V_{tabla}^{proba} = 1.10 * 1.15 * 0.003 = 0.0038 m^3$$

$$V_{vata\ min\ erala}^{proba} = 1.10 * 1.15 * .05 = 1.265 * 0.05 = 0.0634 m^3$$

$$V_{tabla}^{cuptor} = 51 * \delta_{tabla} = 51 * 0.025 = 1.244 m^3$$

$$Q_{vat\ ceramic\ a}^{cuptor} = \rho * V * c_p * \Delta T = 12.434 m^3 * 100 \frac{kg}{m^3} * 1.14 \frac{kJ}{kg * K} * \Delta T = 1417.476 * \Delta T$$

$$Q_{tabla}^{cuptor} = \rho * V * c_p * \Delta T = 1.244 m^3 * 7800 \frac{kg}{m^3} * 0.63 \frac{kJ}{kg * K} * \Delta T = 6152.202 * \Delta T$$



$$Q_{tabla}^{proba} = \rho * V * c_p * \Delta T = 0.0038 m^3 * 7850 \frac{kg}{m^3} * 0.63 \frac{kJ}{kg * K} * \Delta T = 18.7929 * \Delta T$$

$$Q_{vata_{minerala}}^{proba} = \rho * V * c_p * \Delta T = 0.0634 m^3 * 200 \frac{kg}{m^3} * 1.14 \frac{kJ}{kg * K} * \Delta T = 14.4552 * \Delta T$$

$$Q_{lemn}^{proba} = \rho * V * c_p * \Delta T = 0.0051 m^3 * 200 \frac{kg}{m^3} * 2.721 \frac{kJ}{kg * K} * \Delta T = 27.7542 * \Delta T$$

### 5.5.2. Fluxul de căldură transmis prin convecție de la proba către mediul exterior

Fluxul de căldură transmis de la suprafața probei către mediul exterior se determina aplicând relația următoare:

$$\dot{Q}_{CV} = \alpha_{(e)} * S_{proba} * \Delta T \quad (5.30)$$

in care:

$\Delta T$  - diferența dintre temperatura medie a probei (la exterior) și temperatura ambianta, [K]

Coeficientul convectiv de căldura de la proba către exterior, se determina folosind relația:

$$Nu = C * (Gr * Pr)^n \quad (5.31)$$

unde: „C” și „n” – coeficienți determinați în funcție de produsul (Gr\*Pr), (pag. 217. Dan Stafanescu, Leca 1983).

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_{pe} - T_e) * H_{proba}}{\nu^2} \quad (5.32)$$

$$\beta = \frac{1}{T_m} \quad (5.31)$$

$$T_m = \frac{(273,15 + t_{pe}) + (273,15 + t_e)}{2} \quad (5.32)$$

$$Nu = \frac{\alpha_e * H_{proba}}{\lambda_e} \quad (5.33)$$

### 5.5.3. Fluxul de căldură transmis prin radiație de către gazele de ardere probei de testare

Pentru determinarea fluxului de căldură transmis prin radiație se utilizează relațiile uzuale pentru focare de cazane, care sunt valabile pentru volume mari de radiație.

$$\dot{Q}_{gaz} = \sigma * \epsilon_{g-p} * \left[ \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{pi}}{100} \right)^4 \right] * S_{proba} \quad (5.34)$$

unde:

$$\varepsilon_{g-p} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_{proba}} - 1} \text{ - coeficient de emisivitate gaz proba;}$$

$C_0$  – coeficientul de radiație al corpului negru, egal cu: 5.675 W/(m<sup>2</sup>\*K<sup>4</sup>).

$\varepsilon_{proba}$  – emisivitatea materialului primului strat component al probei, [-];

$T_g$  – temperatura gazelor de ardere, [K];

$T_{pi}$  – temperatura interioara pe suprafața probei, [K];

$\varepsilon_g$  – coeficientul/factor de emise al gazelor de ardere, [-], calculat cu relația 5.35.

$$\varepsilon_g = 1 - e^{-K_g * S_g} \quad (5.35)$$

În incinta cuptorului radiază componentele triatomice din gazele de ardere: CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O și N<sub>2</sub>.  
 Presiunile parțiale ale acestor gaze componente se calculează cu relațiile :

$$\begin{aligned} p_{CO_2} &= \frac{V_{CO_2}}{V_g} \\ p_{H_2O} &= \frac{V_{H_2O}}{V_g} \\ p_{N_2} &= \frac{V_{N_2}}{V_g} \end{aligned} \quad (5.36)$$

în care:

$V_{CO_2}$ ,  $V_{H_2O}$  și  $V_{N_2}$  – volumul componentului în unitatea de volum a gazelor de ardere;

$p$  – presiunea totala a gazelor din cuptor - se acceptă  $p = 1$  bar;

$V_g$  – volumul real de gaze de ardere;

$$V_g^{real} = [V_{g_0} + (\alpha - 1) * V_0] * \frac{273,15 + t_{gi}}{273,15} \quad (5.37)$$

in care:

$V_{g_0}$  – volumul de gaze stoichiometrice, [Nm<sup>3</sup>/ Nm<sup>3</sup>];

$\alpha$  – excesul de aer, [-];

$V_0$  – volumul stoichiometric de aer de ardere, [Nm<sup>3</sup>/ Nm<sup>3</sup>];

$t_{gi}$  – temperatura gazelor de ardere, [°C].

Volumul stoichiometric de aer de ardere, volumul de gaze stoichiometrice, volumele componentelor din gazele de ardere, cat si volumul real de gaze de ardere se determina cu relațiile:

$$V_0 = 0,0476 * \left[ 0,5 * CO + 0,5 * H_2 + 1,5 * H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) * C_m * H_n - O_2 \right], [Nm^3 / Nm^3] \quad (5.38)$$

rezultă:

$$V_0 = 0,0476 * \left[ \left( 1 + \frac{4}{4} \right) * 98 + \left( 2 + \frac{2}{4} \right) * 1,5 \right] = 9,498 \text{ [Nm}^3\text{/ Nm}^3\text{]}$$

$$V_{CO_2} = 0,01 * [CO_2 + CO + \sum m * C_m H_n] = 0,01 * [1 * 98 + 2 * 1,5] = 1,01 \text{ [Nm}^3\text{/ Nm}^3\text{]}$$

$$V_{H_2O} = 0,01 * \left[ H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} C_m H_n \right] + 0,016 * V_0 = 0,01 * \left[ \left( \frac{4}{2} \right) * 98 + \left( \frac{2}{2} \right) * 1,5 \right] + 0,016 * 9,496 = 2,127 \text{ [Nm}^3\text{/ Nm}^3\text{]}$$

$$V_{N_2} = 0,79 * V_0 + \frac{N_2}{100} = 0,79 * 9,496 + 0,5 * \frac{1}{100} = 7,507 \text{ [Nm}^3\text{/ Nm}^3\text{]}$$

rezultă:

$$V_g = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} = 10,644 \text{ [Nm}^3\text{/ Nm}^3\text{]}$$

Tabel 5.8. Volumele componentelor din gazele de ardere

Combustibilul	$V_0$ [Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> ]	$V_{CO_2}$ [Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> ]	$V_{H_2O}$ [Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> ]	$V_{N_2}$ [Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> ]	$V_g = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2}$ [Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> ]
$CH_4$ - <b>98%</b>	9,498	1,01	2,127	7,507	10,644
$C_2H_2$ - <b>1,5%</b>					
$N_2$ - <b>0,5%</b>					

Grosimea stratului radiant de gaze din cuptor este dată de relația :

$$S_g = \frac{4 * V}{S_{pereti}}, \text{ [m]} \quad (5.39)$$

unde:

V – volumul incintei, cuptorului, [m<sup>3</sup>];

S<sub>pereti</sub> - suprafața pereților interiori ai incintei, cuptorului, [m<sup>2</sup>]

Constanta de radiație a gazelor radiante din cuptor se determina cu relația este :

$$K_g = \frac{0,80 + 1,60 * p_{H_2O}}{p_{H_2O} + p_{CO_2}} * S_g * \left( 1 - 0,18 * \frac{T_g}{1000} \right) * (p_{H_2O} + p_{CO_2}) \quad (5.40)$$

unde:

T<sub>g</sub> – este temperatura gazelor din cuptor, [K];

#### 5.5.4. Fluxul de căldură pierdut de gazele arse, pe cos

$$\dot{Q}_{gaze\ cos} = \dot{m}_{gaze} * c_{pgaze} * (T_{gaze\ cos} - T_e) \quad [W] \quad (5.41)$$

in care:

$\dot{m}$  - debitul masic de gaze la cos, [kg/s];

$c_{pgaz}$  - căldura specifică a gazelor la cos, la temperatura medie, [kJ/kg\*K];

$T_{gaze\ cos}$  - temperatura gazelor la ieșirea din cos, [K];

$T_e$  - temperatura mediului exterior, [K].

#### 5.5.5. Fluxul de căldură transferat între incinta și exterior

$$Q_{pierderi} = k * S * \Delta T = k * S * (T_i - T_e) \quad (5.42)$$

unde:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (5.43)$$

gaze                      aer

#### 5.5.6. Temperatura de aprindere a plăcii din lemn.

Temperatura de aprindere a plăcii din lemn s-a determinat prin calcul, aplicând relațiile de mai jos.

Fluxul total de căldură pe fața interioară a probei este suma dintre fluxul de căldură transferat de la gaze la probă și de la pereții incintei la probă.

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{gaz} = k * S * (t_g - t_e), \quad [W] \quad (5.44)$$

Unde:

$K$  - coeficient global de transfer de căldură de la interiorul cuptorului, către mediul exterior, calculat cu relația:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{1}{\alpha_{cv}} + \sum \left( \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right) + \frac{1}{\alpha_e}}, \quad [W/m^2 * K] \quad (5.45)$$

Din fluxul total de căldură, determinat conform relației 5.44, o parte este acumulat în probă, iar o parte este transmis prin convecție mediului exterior, pe partea exterioară a probei. Matematic acest lucru este exprimat cu relația:

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{gaz} = \dot{Q}_{ac} + \alpha_{cv} * (t_{pe} - t_e), \quad [W] \quad (5.46)$$

Din relația 5.46 rezultă expresia matematică pentru calculul temperaturii peretelui pe fața neexpusă (către exterior). Această relație are următoarea formă:

$$t_{pe} = \frac{\left(\dot{Q}_{to} - \dot{Q}_{ac}\right) + \alpha_{cv} * t_e}{\alpha_{cv}} = \frac{\left(\dot{Q}_{to} - \dot{Q}_{ac}\right)}{\alpha_{cv}} + t_e, \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (5.47)$$

## 5.6. REZULTATE EXPERIMENTALE

### 5.6.1. Aprecieri calitative

În urma experimentărilor s-au desprins următoarele aprecieri calitative, după cum urmează:

- proba a fost montată pe peretele suport fără modificarea integrității acesteia cu suficient timp înainte de începerea experimentărilor, așa cum poate fi observat în figura 5.28. Acest lucru este impus de timpul de condiționare a probei respectiv de uscarea materialului de adaos.



Fig.5.28. Momentul începerii testului.

- temperatura înregistrată în interiorul cuptorului a urmărit curba standard temperatură-timp, impusă. Acest lucru a fost posibil prin reglarea automată a amestecului aer-gaz, pentru fiecare arzător în parte, utilizând tablourile de automatizare, vana de admisie aer cu acționare electrică și sistemul de alimentare cu gaz combustibil, prezentate în figurile de mai jos.



Fig. 5.29. Tablourile de automatizare pentru fiecare arzător.



Fig. 5.30. Alimentarea cuptorului cu amestec gaz-aer în vederea funcționării după curba standard.

- temperaturile au fost înregistrate și vizualizate în timp real, la un interval de 1 minut. Temperaturile măsurate au înregistrat creșteri în timp, valorile obținute fiind unele firești. Sistemul de achiziție în timp real este prezentat în figura 5.31.

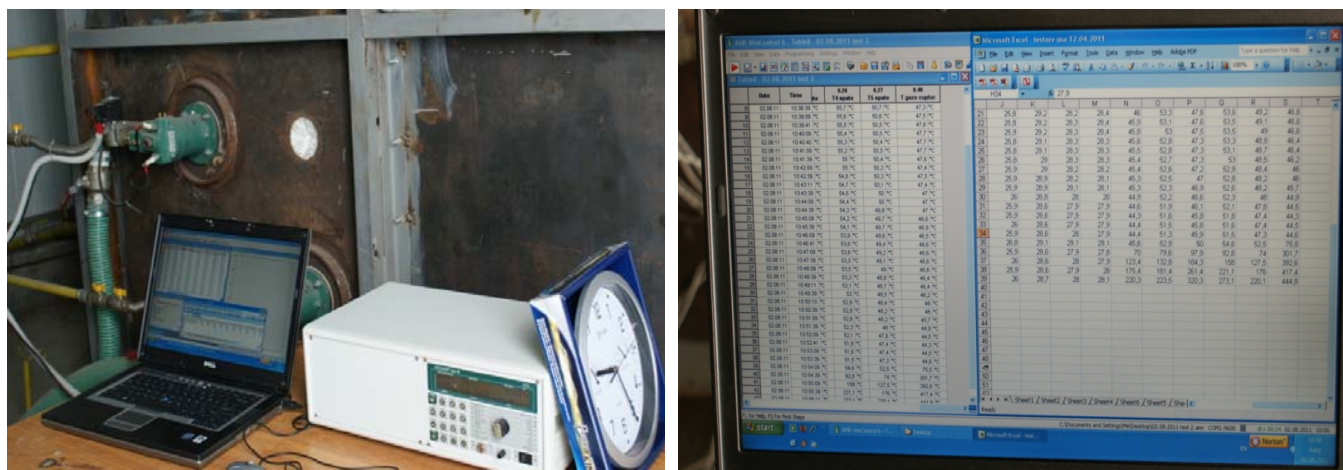


Fig.5.31. Sistemul de achiziție date.

- nu au fost vizualizate fisuri la nivelul probei de testat până la momentul inițierii arderii (incendiului), așa cum poate fi observat în figura 5.32 și 5.33.



Fig.5.32. Momentul în care apar volatilele.



Fig.5.33. Momentul începerii carbonizării materialului.

- nu au fost înregistrate deteriorări ale peretelui suport pe care s-a montat proba de testare;
- testul a fost considerat încheiat în momentul apariției flăcării pe fața exterioară a elementului de construcție (proba de testat), aspect sesizat atât vizual cât și cu ajutorul camerei în infraroșu tip BCAM 5.



Fig.5.34. Momentul final al experimentului.



Fig.5.35. Proba după oprirea testului și stingerea „incendiului”.

- temperaturile pe suprafețele exterioare ale cuptorului nu au depășit valoarea de 30°C, valoare impusă de norme privind securitatea de exploatare a acestor standuri de testare (cuptoare).



### 5.6.2. Aprecieri cantitative

Rezultatele experimentale obținute în urma testării rezistenței la foc a probei, cu caracteristicile și dimensiunile prezentate la punctul 5.3. sunt prezentate în cele ce urmează.

Valorile măsurate pentru temperaturile pereților interiori ai cuptorului, temperaturile interioare și exterioare ale probei, temperaturilor gazelor de ardere și a aerului exterior sunt prezentate în tabelar în cele ce urmează.

Tabel 5.9. Valorile temperaturilor, măsurate pe peretele opus peretelui de probă (în spatele cuptorului) și temperatura gazelor de ardere.

Timp. min.	Tp spate 1 [°C]	Tp spate 2 [°C]	Tp spate 3 [°C]	Tp spate 4 [°C]	Tp spate 5 [°C]	Tp spate mediu [°C]	T gaze cuptor [°C]
1	2	3	4	5	6	7	8
0	44,4	51,3	45,9	51,5	47,3	48,08	44,6
1	70	79,6	97,9	92,8	74	82,86	200
2	175,4	181,4	261,4	221,1	176	203,06	307
3	252,8	258,4	365,1	314,2	252,9	288,68	454,6
4	304,5	314	424,5	378,2	311,2	346,48	478,1
5	365,9	373,5	482,2	437	359,6	403,64	522,4
7	470,6	469,5	579,5	519,1	432,1	494,16	600,7
7	525,1	524,2	618,4	562,8	489,4	543,98	611,1
8	559	561,5	639,8	589,6	521,8	574,34	625,2
9	583,6	587,2	659,8	612,9	551,4	598,98	648,5
10	611	610,5	676,7	634,3	570	620,50	657,4
11	632,7	641,3	707,8	664,7	613,4	651,98	675,3
12	643,7	656,9	721,8	681,4	638,2	668,40	678,8
13	663,2	671,8	728,7	695,4	653,5	682,52	682,6
14	678,4	689,1	746,4	707,3	669,6	698,16	708,2
15	686,3	694,8	752,8	718,4	684,7	707,40	715,8
16	705,1	713,4	766	731,7	701,4	723,52	724
17	714,3	721,5	772,5	740,2	711,2	731,94	732,7
18	725,5	735,4	788,9	750,7	725,5	745,20	746,1
19	738,7	749,4	800,5	764,5	736,8	757,98	758,5
20	753,8	762,8	814,4	777,7	751,5	772,04	773,7
21	760,8	773,5	823,6	785,3	759,1	780,46	771,5
22	768,9	783,5	830,4	793,5	769,5	789,16	798,6
23	784,5	794	843,2	801,4	776,4	799,90	802,1
24	792,6	799,8	848,4	810,7	787,3	807,76	808,9
25	806,6	810,6	859,6	820,4	796,4	818,72	819,8
26	810,4	815,6	861,7	823,6	800,9	822,44	823,6
27	815,9	823,6	870,9	831,4	810,3	830,42	831,8
28	728,7	744,6	749,8	758	738,8	743,98	693,90
29	642	662,9	659,3	679,5	657,9	660,32	594
30	573	599	589,3	614,2	596	594,30	539,6
31	522,6	551,5	537,2	563,4	548,6	544,66	485,3
32	483,9	513,7	498	526,3	511,9	506,76	454,9
33	466,4	496,9	480,3	509,6	494,7	489,58	435,5

În tabelul 5.9. (coloanele 2,3,4,5 și 6) sunt prezentate valorile măsurate, în timp, ale temperaturilor aferente peretelui opus probei de încercat, cel de la care proba va primi flux de căldură prin radiație. Coloana 7 cuprinde valorile temperaturii medii a peretelui opus probei de încercat, calculată ca medie aritmetică între cele 5 valori. Temperaturile medii calculate au valori crescătoare în intervalul 1 minut și 27 minute, valori cuprinse între 48°C și 830°C. În același interval de timp, temperatura gazelor de ardere înregistrează valori crescătoare, coloana 8. Valorile temperaturii gazelor de ardere sunt superioare temperaturii medii a peretelui interior cuptorului, până la minutul 20, după care cele două valori devin apropiate.

Variația temperaturilor cuprinse în tabelul 5.9. este prezentată grafic în figura 5.36.

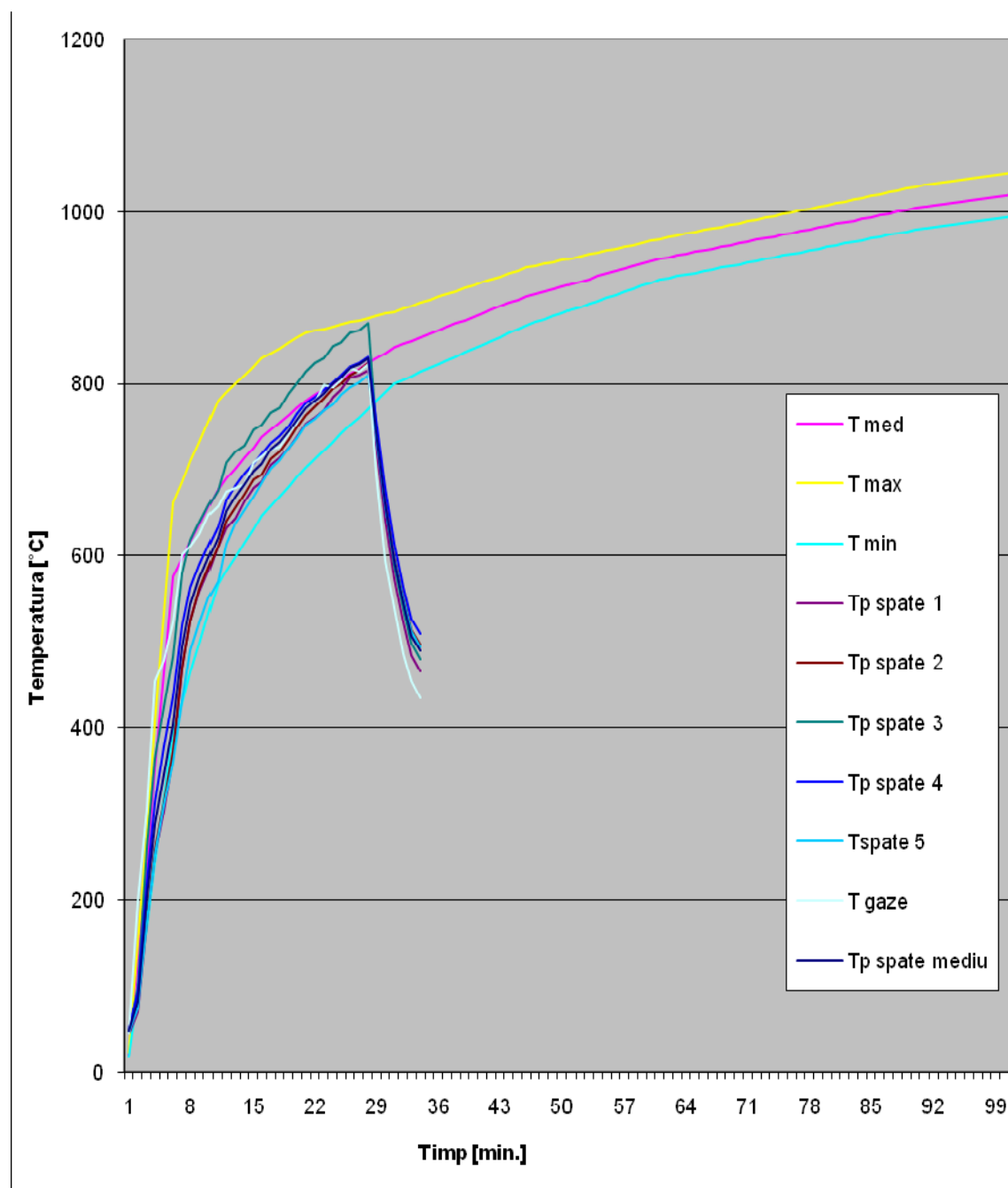


Fig. 5.36. Variația temperaturilor pe perețele opus probei de testat.

Din figura 5.36. se observa că: temperaturile corespunzătoare celor cinci puncte de măsură, aferente peretelui opus de testare, în intervalul de timp min. 1 ÷ min. 28, urmăresc curba standard a temperaturii în timp ( $T_{med}$ ). Aceste valori se încadrează între valorile minime ( $T_{min.}$ ) și valorile maxime ( $T_{max.}$ ), impuse de standard. Acest aspect evidențiază faptul că automatizarea funcționării cuptorului a răspuns cerințelor standard.

La nivelul probei testate, pe partea metalică, la interiorul cuptorului, valorile temperaturilor sunt prezentate în tabelul 5.10.

Tabel 5.10. Temperaturi ale probei, pe suprafața plăcii metalice (între placă și izolație), spre interiorul cuptorului.

$T_{pi\ 1}$ [°C]	$T_{pi\ 2}$ [°C]	$T_{pi\ 3}$ [°C]	$T_{pi\ 4}$ [°C]	$T_{pi\ 5}$ [°C]	$T_{pi\ 6}$ [°C]	$T_{pi\ med.}$ [°C]
48	49,1	49,2	49,4	49,3	50,4	49,23
51,5	54,4	54,9	52,7	56,2	56,1	54,30
73,7	84,4	84,7	75,8	87,5	89,3	82,57
109,4	126,8	125,9	112,4	128,7	134,4	122,93
148,3	174,8	172,3	156,3	174,2	183,8	168,28
192,2	225,3	221,1	202,5	222,9	234,6	216,43
254,5	289,1	287,2	263,9	291,2	299,4	280,88
318,5	352,7	352,9	327,8	358,3	363,2	345,57
378,3	410,7	412	387,8	418,4	420,1	404,55
432,8	462,5	462,7	441,4	469,3	470,8	456,58
476,2	506,8	503,5	483,2	510	512,9	498,77
520,6	549,4	544,2	525,3	548,7	552	540,03
554,5	580,9	574	557,1	576,6	580,1	570,53
582,7	606,3	598,4	583,7	600	603,6	595,78
605,5	627	617,4	604,6	619	622,9	616,07
624	643,6	633,7	622,9	634,8	639,4	633,07
640	661,1	648	638,9	648,3	654,1	648,40
653,6	675,3	660,7	652,4	660,3	666,7	661,50
665	685,9	672,7	663,8	671	677,8	672,70
676,9	697,9	685,1	675,1	682,4	689,4	684,47
687,4	711,3	696,4	685,1	693,2	700,2	695,60
698,9	726,3	706,8	694,4	703,5	709,1	706,50
709	743,6	717,6	704	714,3	718,4	717,82
718	749,6	727,1	712,8	724	726,5	726,33
725,9	753	735,2	720,5	732,5	733,2	733,38
734,7	755,6	743,7	728,4	740,6	740,4	740,57
741,6	756,4	750,2	734,9	747,2	747,2	746,25
749,6	761,7	757,9	742,5	754,3	754,7	753,45
745,3	764,3	749,9	738,8	749,3	749,1	749,45
709,1	719,3	684,5	700,5	715,3	716,8	707,58
660	634	656	617,1	672,3	674,9	652,38
599,9	569,7	615,8	572,6	630,6	631,8	603,40
554	512,7	579,3	591,3	592,8	590,8	570,15
538,3	487,2	562,2	578,1	571,6	567,9	550,88

În algoritmul de calcul al fluxului de căldură solid-solid și gaz solid s-au utilizat temperatura medie a probei, calculată ca media aritmetică a temperaturilor măsurate în cele șase puncte.

Temperatura medie a feței expuse (la foc) a probei, calculată așa cum s-a menționat anterior, are valori inferioare temperaturii medii a peretelui opus și a gazelor de ardere.

Variația în timp a temperaturilor pe partea expusă a probei este prezentată grafic în figura 5.37.

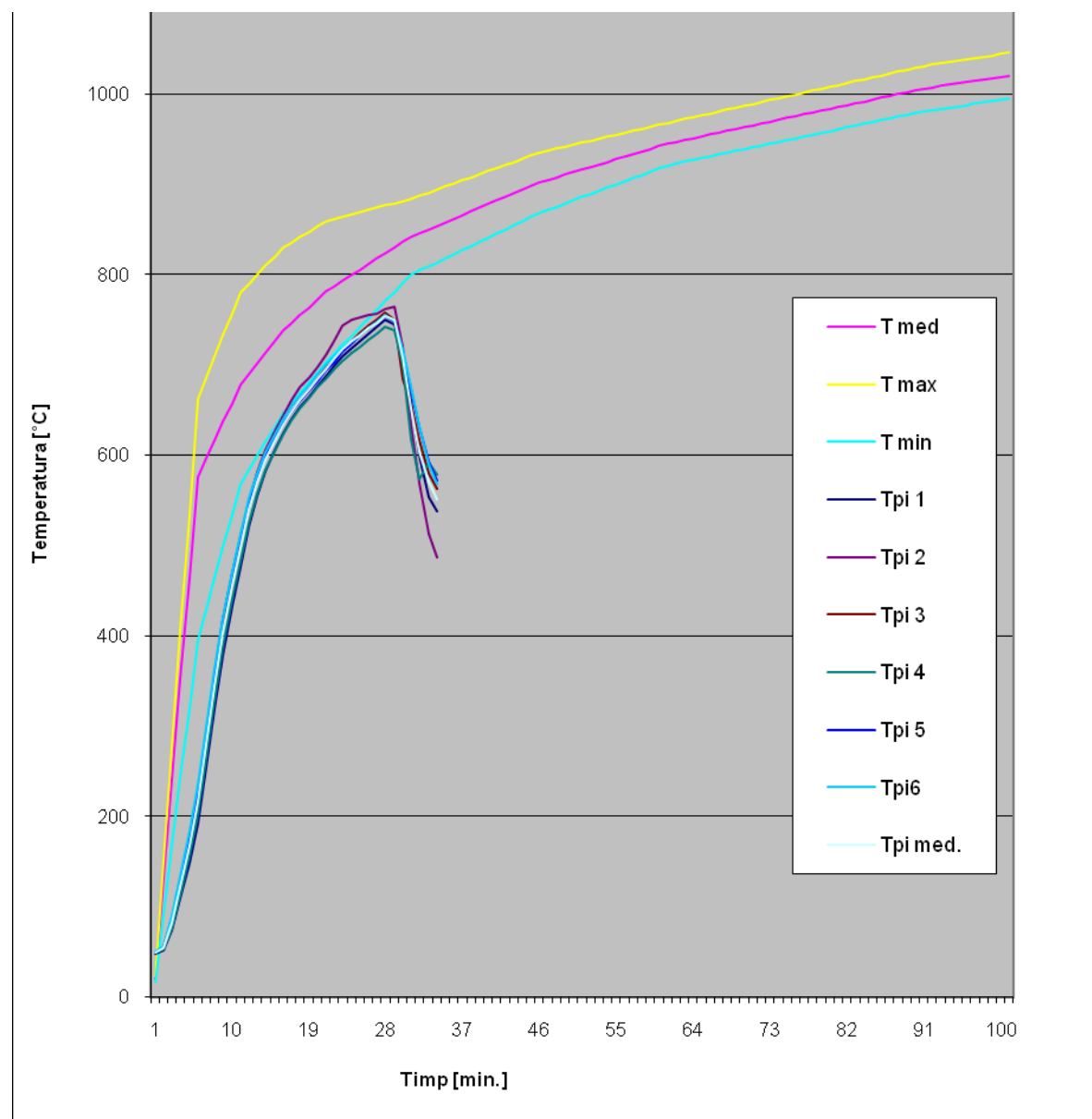


Fig. 5.37. Variația temperaturilor la contactul dintre primul și al doilea strat componente ale probei de testare.

Din figură se observa că: temperaturile înregistrate de senzorii montați pe probă, în intervalul de temperatură testat, urmăresc curba standard a temperaturii în timp ( $T_{med.}$ ).

La nivelul probei testate, pe fața neexpusă, valorile temperaturilor măsurate în cele șase puncte sunt prezentate în tabelul 5.11.

Tabel 5.11. Temperaturi pe suprafața păcii din lemn (între izolație și placă).

Tpe 1 [°C]	Tpe 2 [°C]	Tpe 3 [°C]	Tpe 4 [°C]	Tpe5 [°C]	Tpe 6 [°C]	Tpe med. [°C]
27,9	27,4	28,2	28,6	28	27,9	28,00
27,9	27,4	28,2	28,6	27,9	27,8	27,97
27,8	27,4	28,2	28,6	27,9	28	27,98
28,1	27,7	28,4	28,8	28,1	28,4	28,25
28,6	28	28,8	29,2	28,4	28,9	28,65
29,6	28,7	29,6	30	29,2	30	29,52
31,7	30,3	31,2	31,6	30,9	32,1	31,30
35,7	33,2	34,3	34,7	34	35,4	34,55
43,3	38,7	39,7	40,1	39,3	40,5	40,27
55,2	48	48,7	49,1	50	48,1	49,85
72,5	62,2	62,4	62,8	68,2	58,7	64,47
88,9	78,4	80,5	80,9	87	72	81,28
96,2	90,7	95,5	95,9	96,3	84,4	93,17
98,4	97,3	102,4	102,8	98,8	89,7	98,23
100,1	100	104,9	105,3	101,8	87,9	100,00
106,1	107,1	112,8	113,2	108	90,1	106,22
111,2	112,2	122,8	123,2	113,7	99,4	113,75
117,9	117,7	133,2	133,6	121,5	110,6	122,42
126,9	125,8	144,4	144,8	130,9	118,8	131,93
139,2	136,2	157,7	158,1	143,8	125,1	143,35
155,7	149,2	172,7	173,1	160,6	134	157,55
175,6	166,5	191,5	191,9	179,1	145,1	174,95
194,7	185,2	213,2	213,6	197,4	165	194,85
211,4	204,3	234,4	234,8	214	189,6	214,75
226	217,3	251,5	251,9	226,5	206,6	229,97
243,9	229,2	263,3	263,7	239,4	219	243,08
259,3	239,8	275,9	276,3	248,8	223,2	253,88
267,2	252,8	287,6	288	259,3	241	265,98
276,7	368,9	301,1	301,5	276,9	447,8	328,82
128,5	73	116,2	116,6	118,6	50,6	100,58
113,4	55,7	92,8	93,2	91,7	32,6	79,90
119,6	59,2	84,4	84,8	81,9	32,1	77,00
90,9	51,1	76	76,4	59,3	30,5	64,03
80,1	47,1	75,1	75,5	58,4	29,9	61,02

În algoritmul de calcul al fluxului de căldură transferat de la probă la mediul exterior s-a utilizat temperatura medie a probei, calculată ca media aritmetică a temperaturilor măsurate în cele șase puncte.

Temperatura medie a feței neexpuse (la foc) a probei, calculată așa cum s-a menționat anterior, are valori inferioare temperaturii medii a feței expuse.

Variația în timp a temperaturilor suprafeței neexpuse la foc, este prezentată grafic în figura 5.38.

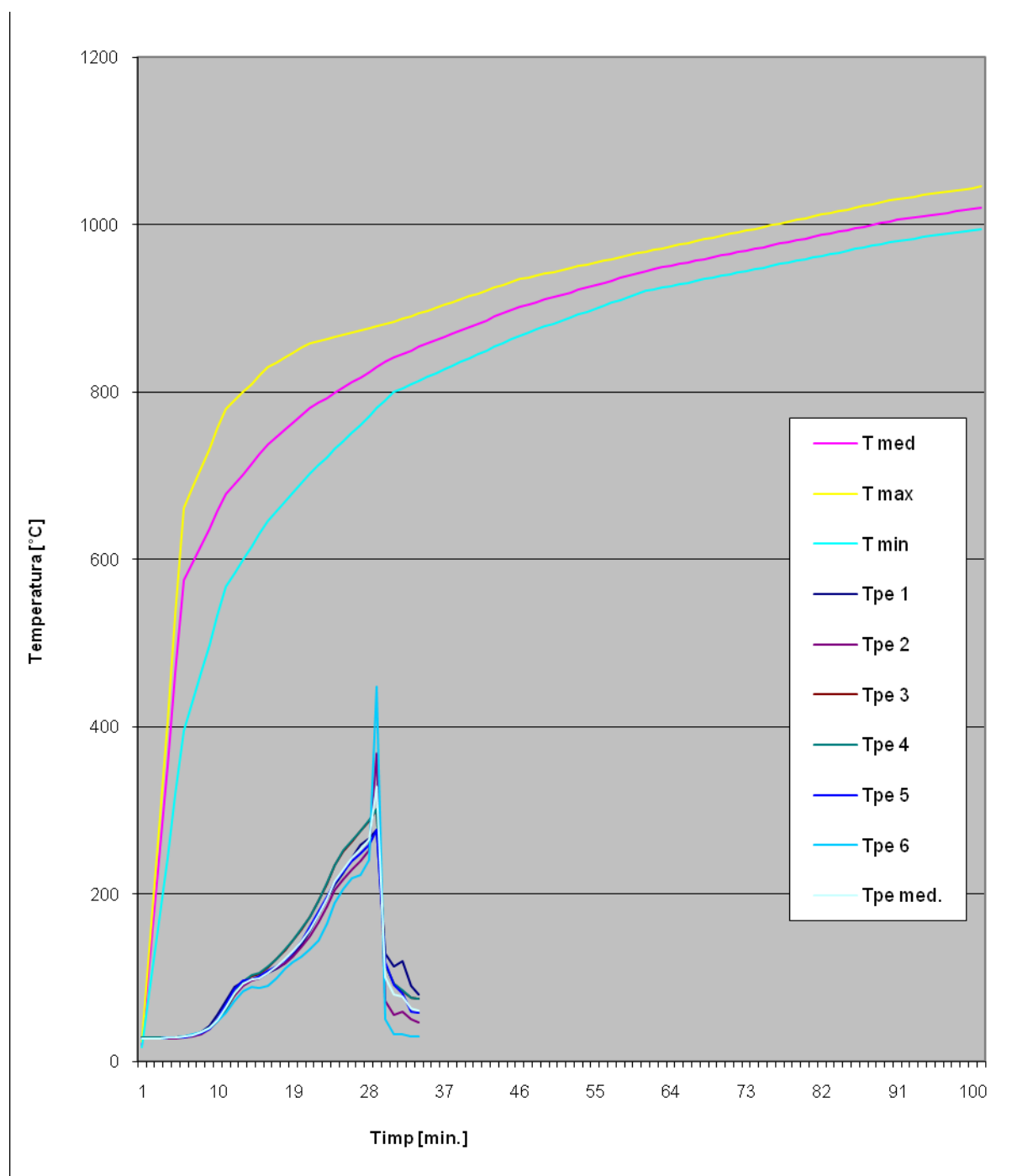


Fig. 5.38. Variația temperaturilor la interfața izolație lemn.

Din figura se observa ca: temperaturile înregistrate de senzorii montați pe fața neexpusă a probei, la interfața dintre vata minerala și lemn, sunt cu mult mai mici decât în cazul temperaturilor măsurate pe fața metalică. Fapt explicat de rezistența termică a stratului izolator (vata minerală cu grosimea de 50mm). Cu toate acestea, după un interval de timp de circa 28 de minute și o temperatură de 400°C, proba a luat foc.

La nivelul probei testate, la interfața lemn și aer exterior, spre exteriorul cuptorului, valorile temperaturilor sunt prezentate în tabelul 5.12. Valorile temperaturilor înregistrate prin măsurări, pe fața exterioară a probei sunt confirmate și de imagini vizuale realizate cu ajutorul termografiei în IR, cuprinse în anexa 1 (Raport Termografie).

Tabel 5.12. Temperaturi pe suprafața exterioară a plăcii din lemn.

$T_{pfe\ 1}$ [°C]	$T_{pfe\ 2}$ [°C]	$T_{pfe\ 3}$ [°C]	$T_{pfe\ 4}$ [°C]	$T_{pfe\ 5}$ [°C]	$T_{pfe\ med.}$ [°C]
26,20	26	25,9	25,9	25,4	26,20
33,20	34,2	33	34,8	32,1	26,17
65,4	66,7	63,3	71,6	61,8	26,18
75,6	67,6	55,1	68,9	60	26,45
83,4	68,4	58,5	70,5	60,3	26,85
85,9	67,6	61	75	60,3	27,72
108	110,1	105,2	108,2	104,8	29,50
164,2	155,7	153,2	175,3	136,8	32,75
171	166,6	152,6	184,9	158,8	38,47
175,3	165,7	125,6	175,4	142	48,05
170,4	173,5	165,5	159,2	152,2	62,67
199,8	173,3	185,5	218,4	178,1	79,48
206,4	200,2	212,1	222,3	195,1	91,37
210,8	208	215,4	222,3	197,2	96,43
212,6	209	215,3	228,3	196,2	98,20
215,3	222,7	217,8	230,5	204	104,42
213,1	215,3	227	235,3	203,8	111,95
216,4	209,8	231,1	235,1	206,2	120,62
215,9	213,2	228,1	234,5	208	130,13
214,4	210,3	229,1	236,1	207,2	141,55
220,8	212,9	234,5	230,4	211,9	155,75
230,5	216,1	235,8	237	213,5	173,15
227,1	225,5	239,3	238,5	215	193,05
221	214,3	252,8	230,4	217,5	212,95
232,7	218,4	250,1	253,4	217,4	228,17
235,3	213,9	242,9	251,2	226,2	241,28
238,2	223,3	251,7	248,7	232,7	252,08
240,7	222	254,7	250,2	230,3	264,18
164,2	155,7	153,2	175,3	136,8	327,02
108	110,1	105,2	108,2	104,8	98,78
85,9	67,6	61	75	60,3	78,10
75,6	67,6	55,1	68,9	60	75,20
65,4	66,7	63,3	71,6	61,8	62,23
33,20	34,2	33	34,8	32,1	59,22

Variația în timp a temperaturilor la interfața lemn aer exterior este prezentată grafic în figura 5.39.

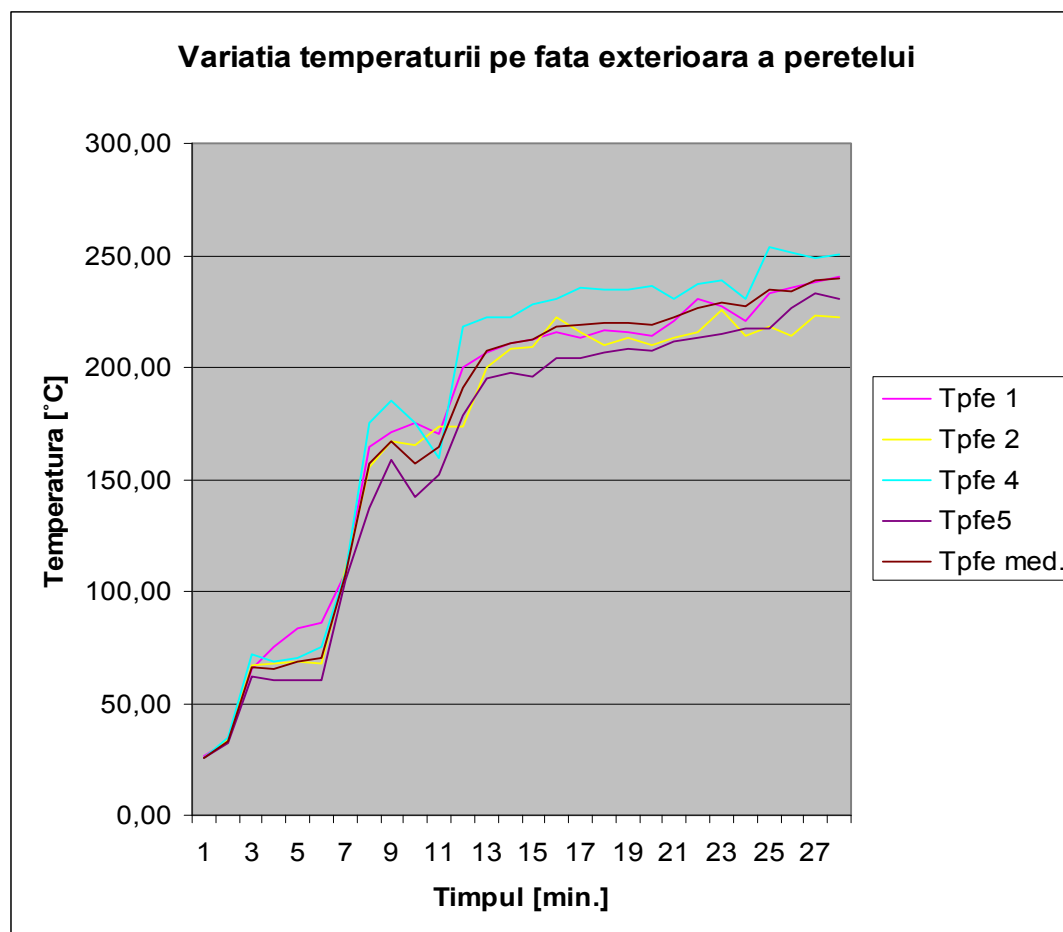


Fig. 5.39. Variația temperaturii pe fata exterioara a probei.

Din figură se observa că: temperaturile înregistrate de senzorii montați pe proba, la interfața dintre lemn și aerul din laborator, au o evoluție crescătoare de la temperatura medie de 20°C până la temperatura de 260°C, aspect vizualizat cu ajutorul camerei în flăcări și prezentat în figura 5.40.



Fig. 5.40. Momentul aprinderii ultimului strat al probei (placa de lemn).



În figura 5.41. este prezentată grafic, variația temperaturilor medii pentru: gazele de ardere din interiorul cuptorului; fața metalică a probei, interfața izolație și placa de lemn; interfața lemn aer exterior.

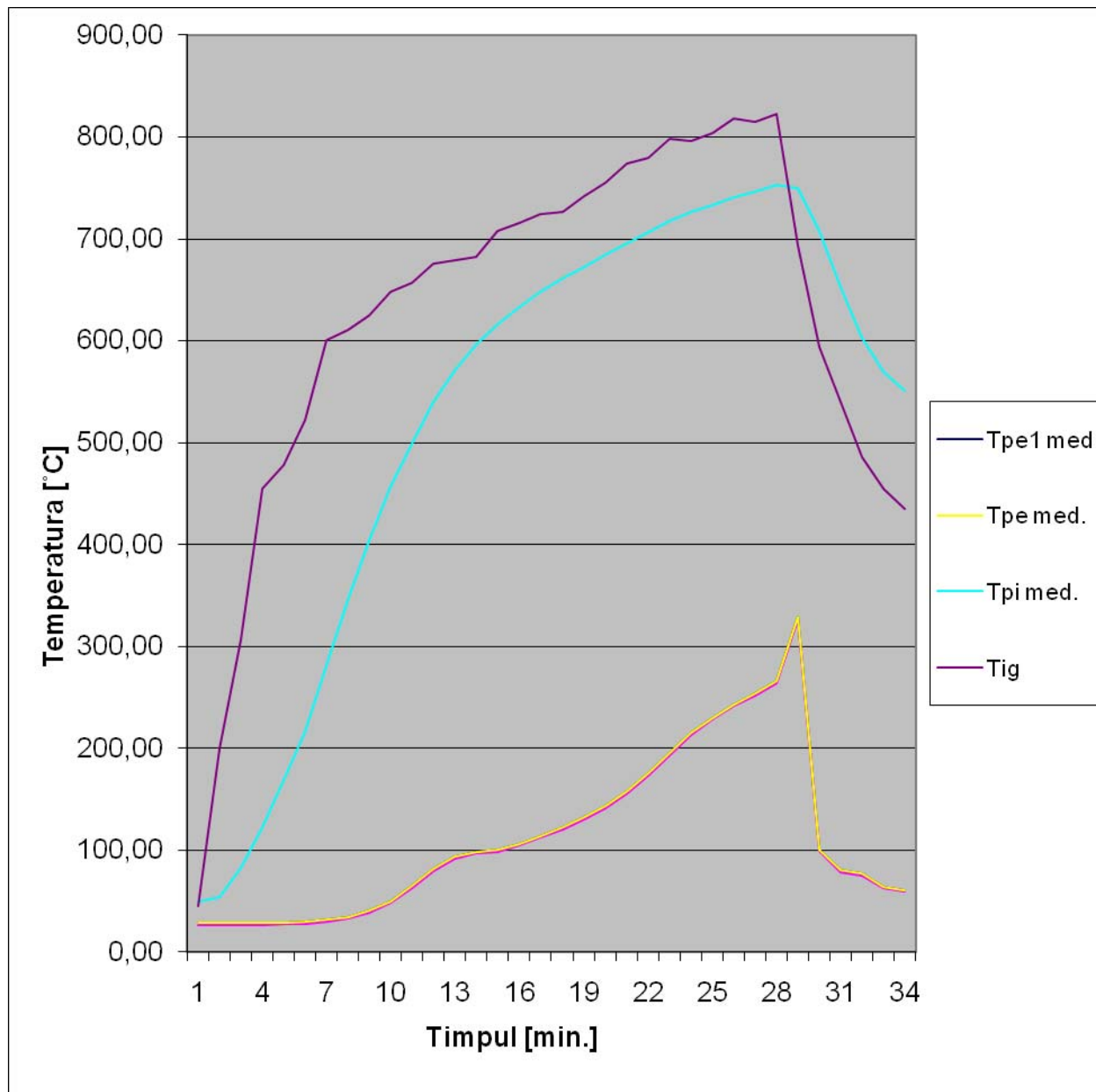


Fig. 5.41. Variația temperaturilor în proba de testare.

Valorile temperaturilor măsurate și celor medii calculate, pot fi considerate de încredere având în vedere că au valori care se înscriu pe deoparte în limitele curbelor standard și pe de altă parte în limitele precizate în derivatograma privind arderea lemnului.

În tabelul 5.13. este prezentată variația în timp a temperaturii, în straturile probei.

Tabel 5.13. Variația în timp a temperaturilor în proba de testare.

Timp [s]	$\delta$ strat [mm]	Temp. [°C]	Timp [s]	$\delta$ strat [mm]	Temp. [°C]	Timp [s]	$\delta$ strat [mm]	Temp. [°C]	Timp [s]	$\delta$ strat [mm]	Temp. [°C]	Timp [s]	$\delta$ strat [mm]	Temp. [°C]
<b>0</b>	3,00	25,60	<b>7</b>	3,00	25,60	<b>14</b>	3,00	25,70	<b>21</b>	3,00	25,80	<b>28</b>	3,00	25,90
	4,00	26,20		4,00	32,75		4,00	98,20		4,00	173,15		4,00	327,02
	8,00	27,97		8,00	40,27		8,00	106,22		8,00	194,85		8,00	100,58
	58,00	54,30		58,00	404,55		58,00	633,07		58,00	717,82		58,00	707,58
	610,00	200,00		60,00	625,20		60,00	715,80		60,00	798,60		60,00	594,00
<b>1</b>	3,00	25,60	<b>8</b>	3,00	25,70	<b>15</b>	3,00	25,80	<b>22</b>	3,00	25,80	<b>29</b>	3,00	25,90
	4,00	26,17		4,00	38,47		4,00	104,42		4,00	193,05		4,00	98,78
	8,00	27,98		8,00	49,85		8,00	113,75		8,00	214,75		8,00	79,90
	58,00	82,57		58,00	456,58		58,00	648,40		58,00	726,33		58,00	652,38
	60,00	307,00		60,00	648,50		60,00	724,00		60,00	796,00		60,00	539,60
<b>2</b>	3,00	25,60	<b>9</b>	3,00	25,70	<b>16</b>	3,00	25,80	<b>23</b>	3,00	25,80	<b>30</b>	3,00	26,00
	4,00	26,18		4,00	48,05		4,00	111,95		4,00	212,95		4,00	78,10
	8,00	28,25		8,00	64,74		8,00	122,42		8,00	229,97		8,00	77,00
	58,00	122,93		58,00	498,77		58,00	661,50		58,00	733,38		58,00	603,40
	60,00	454,60		60,00	657,40		60,00	726,70		60,00	803,90		60,00	485,30
<b>3</b>	3,00	25,60	<b>10</b>	3,00	25,70	<b>17</b>	3,00	25,70	<b>24</b>	3,00	25,90	<b>31</b>	3,00	25,90
	4,00	26,45		4,00	62,67		4,00	120,62		4,00	228,17		4,00	75,20

UTCB  
 Facultatea de Inginerie a Instalațiilor  
 Catedra de Termotehnică

TEZĂ DE DOCTORAT

	8,00	28,65		8,00	81,28		8,00	131,93		8,00	243,08		8,00	64,03
	58,00	168,28		58,00	540,03		58,00	672,70		58,00	740,57		58,00	570,15
	60,00	478,10		60,00	675,30		60,00	742,10		60,00	817,80		60,00	454,90
<b>4</b>	3,00	25,60	<b>11</b>	3,00	25,70	<b>18</b>	3,00	25,80	<b>25</b>	3,00	25,90	<b>32</b>	3,00	25,90
	4,00	26,85		4,00	79,48		4,00	130,13		4,00	241,28		4,00	62,23
	8,00	29,52		8,00	93,17		8,00	143,35		8,00	253,88		8,00	61,02
	58,00	216,43		58,00	570,53		58,00	684,47		58,00	746,25		58,00	550,88
	60,00	522,40		60,00	678,80		60,00	755,50		60,00	814,60		60,00	435,50
<b>5</b>	3,00	25,60	<b>12</b>	3,00	25,70	<b>19</b>	3,00	25,80	<b>26</b>	3,00	25,90			
	4,00	27,72		4,00	91,37		4,00	141,55		4,00	252,08			
	8,00	31,30		8,00	98,23		8,00	157,55		8,00	265,98			
	58,00	280,88		58,00	595,78		58,00	695,60		58,00	753,45			
	60,00	600,70		60,00	682,60		60,00	773,70		60,00	822,80			
<b>6</b>	3,00	25,70	<b>13</b>	3,00	25,70	<b>20</b>	3,00	25,90	<b>27</b>	3,00	26,00			
	4,00	29,50		4,00	96,43		4,00	155,75		4,00	264,18			
	8,00	34,55		8,00	100,00		8,00	174,95		8,00	328,82			
	58,00	345,57		58,00	616,07		58,00	706,50		58,00	749,45			
	60,00	611,10		60,00	708,20		60,00	779,50		60,00	693,90			

Variația grafică a temperaturilor din tabelul 5.13. este prezentată în figura 5.42.

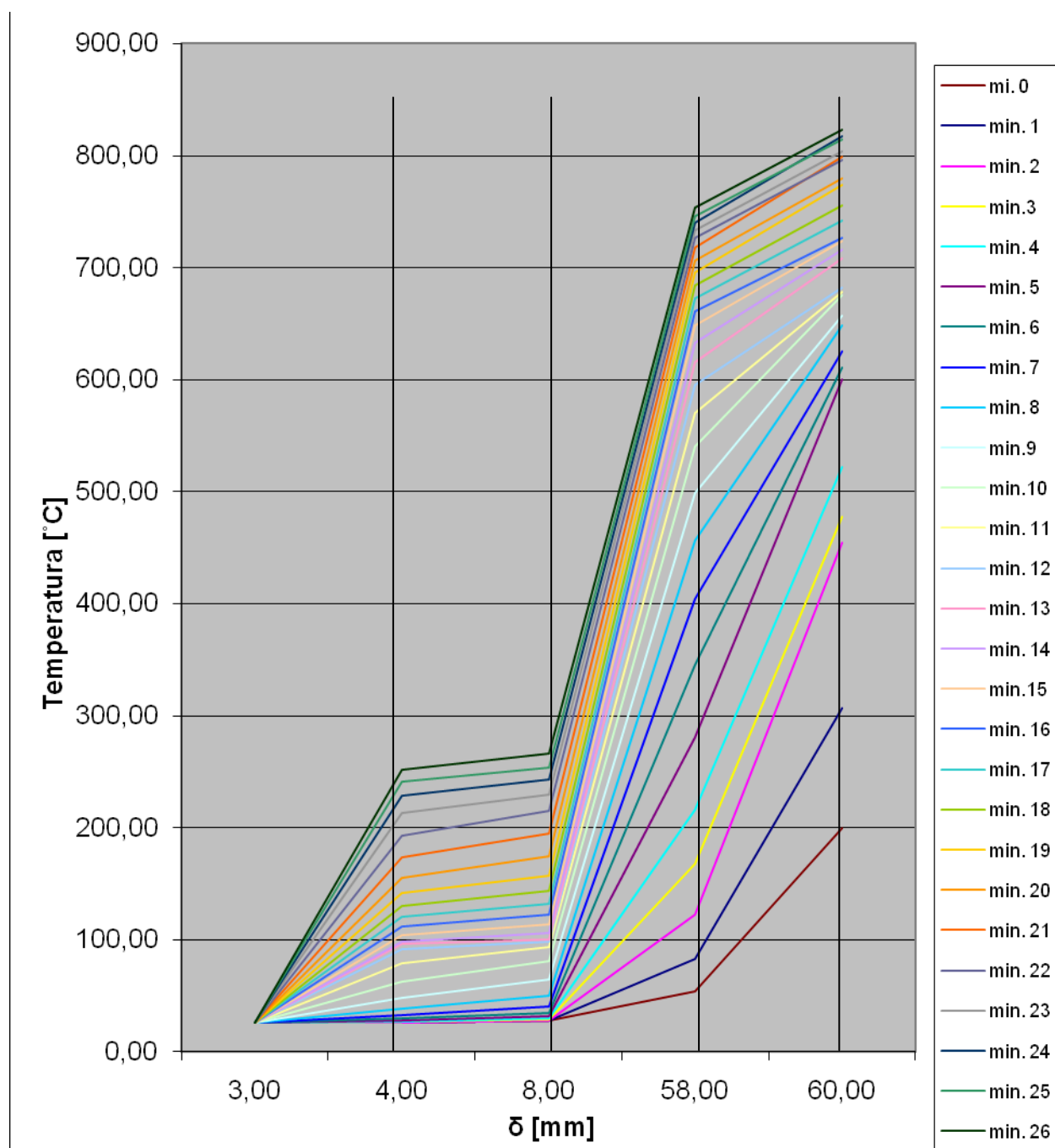


Fig. 5.42. Variația in timp a temperaturilor măsurate.

Din figura 5.42 se observă că temperatura în fiecare strat component are o variație liniară și în consecință se poate aprecia că proba poate fi asimilată ca un perete plan, compus din trei straturi omogene, cu conductivitate termica diferita.

O variație mare a temperaturii este înregistrată în stratul de termoizolație, aspect susținut de studiile teoretice, din literatură.

Pe baza valorilor temperaturilor, determinate experimental, s-au calculat fluxurile de căldură componente ale bilanțului termic din relația 5.2 . Fluxurile de căldură au fost calculate cu relațiile prezentate la punctul 5.5 (metodologia de calcul).

Astfel, s-au calculat:

- fluxul de căldură acumulat în probă, conform valori cuprinse în tabelul 5.14;
- fluxul de căldură transmis de la gazele de ardere la probă, conform valori cuprinse în tabelul 5.15;
- fluxul de căldură transmis de la probă la mediul exterior, conform valori cuprinse în tabelul 5.16;
- fluxul de căldură transmis de la pereții cuptorului la probă, conform valori cuprinse în tabelul 5.17;
- temperatura de aprindere a plăcii de lemn, conform valori cuprinse în tabelul 5.19.

Tabel 5.14. Căldura acumulată în probă.

<b>Timp</b> [min]	<b>T<sub>pi-cuptor</sub></b> [K]	<b>T gaze-cuptor</b> [K]	<b>Q acumulat</b> [W]
0	321,23	317,75	415
1	356,01	473,15	73468
2	476,21	580,15	253213
3	561,83	727,75	180190
4	619,63	751,25	121759
5	676,79	795,55	120546
6	767,31	873,85	190533
7	817,13	884,25	104982
8	847,49	898,35	64122
9	872,13	921,65	52099
10	893,65	930,55	45588
11	925,13	948,45	66410
12	941,55	951,95	34650
13	955,67	955,75	29820
14	971,31	981,35	33017
15	980,55	988,95	19574
16	996,67	997,15	34051
17	1005,09	1005,85	17880
18	1018,35	1019,25	28079
19	1031,13	1031,65	27110
20	1045,19	1046,85	29795
21	1053,61	1044,65	18044
22	1062,31	1071,75	18565
23	1073,05	1075,25	22803
24	1080,91	1082,05	16732
25	1091,87	1092,95	23200
26	1095,59	1096,75	8007
27	1103,57	1104,95	17187
28	1017,13	967,05	6482

Tabel 5.15. Căldura transmisă prin convecție de la probă către mediul exterior.

Timp [s]	T <sub>aer-ext.</sub> [°C]	T <sub>med.</sub> [K]	$\vartheta$ [mp/s]	Pr [-]	$\beta$ [K <sup>-1</sup> ]	Gr [-]	Gr*Pr [-]	n -	C -	Nu [-]	$\lambda$ [W/m*K]	$\alpha$ [W/m <sup>2</sup> *K]	S <sub>probă</sub> m <sup>2</sup>	Q <sub>cv</sub> [W]
0	25,60	299,05	0,0000155	0,702	0,00334	89768966,39	63017814,41	0,250	0,389	34,66	0,026	0,83	1,265	0,63
1	25,60	299,03	0,0000155	0,702	0,00334	84786526,92	59520141,90	0,250	0,389	34,17	0,026	0,82	1,265	0,59
2	25,60	299,04	0,0000155	0,702	0,00334	87277816,08	61269026,89	0,250	0,389	34,42	0,026	0,82	1,265	0,61
3	25,60	299,18	0,0000155	0,702	0,00334	127119567,65	89237936,49	0,250	0,389	37,81	0,026	0,90	1,265	0,97
4	25,60	299,38	0,0000155	0,702	0,00334	186815653,45	131144588,72	0,250	0,389	41,63	0,026	1,00	1,265	1,57
5	25,60	299,81	0,0000155	0,702	0,00334	315883943,80	221750528,55	0,250	0,389	47,47	0,026	1,13	1,265	3,04
6	25,70	300,75	0,0000155	0,702	0,00333	565323112,89	396856825,25	0,250	0,389	54,90	0,026	1,31	1,265	6,31
7	25,60	302,33	0,0000155	0,702	0,00331	1058158588,78	742827329,32	0,250	0,389	64,22	0,027	1,56	1,265	14,10
8	25,70	305,23	0,0000162	0,701	0,00328	1721496967,46	1206769374,19	0,333	0,389	414,15	0,027	10,12	1,265	163,44
9	25,70	310,03	0,0000166	0,700	0,00323	2831281346,73	1981896942,71	0,333	0,389	488,63	0,028	12,30	1,265	347,88
10	25,70	317,33	0,0000170	0,6985	0,00315	4365084001,50	3049011175,05	0,333	0,389	564,07	0,028	14,31	1,265	669,03
11	25,70	325,74	0,0000183	0,6975	0,00307	5349465067,09	3731251884,30	0,333	0,389	603,35	0,028	15,52	1,265	1056,09
12	25,70	331,68	0,0000188	0,6965	0,00301	6070400522,26	4228033963,76	0,333	0,389	629,02	0,029	16,47	1,265	1368,04
13	25,70	334,22	0,0000190	0,696	0,00299	6346335861,84	4417049759,84	0,333	0,389	638,25	0,029	16,83	1,265	1505,61
14	25,70	335,10	0,0000190	0,696	0,00298	6487697762,09	4515437642,42	0,333	0,389	642,96	0,029	16,95	1,265	1554,59
15	25,80	338,26	0,0000195	0,695	0,00296	6602435017,46	4588692337,14	0,333	0,389	646,42	0,029	17,22	1,265	1712,35
16	25,80	342,03	0,0000200	0,694	0,00292	6781581360,43	4706417464,14	0,333	0,389	651,90	0,030	17,54	1,265	1911,72
17	25,70	346,31	0,0000203	0,6938	0,00289	7148901794,61	4959908065,10	0,333	0,389	663,40	0,030	17,97	1,265	2157,90
18	25,80	351,12	0,0000208	0,693	0,00285	7433650831,20	5151520026,02	0,333	0,389	671,83	0,030	18,32	1,265	2418,26
19	25,80	356,83	0,0000211	0,692	0,00280	7869991409,14	5446034055,13	0,333	0,389	684,40	0,031	18,98	1,265	2778,62
20	25,90	363,98	0,0000221	0,69	0,00275	7882201708,42	5438719178,81	0,333	0,389	684,09	0,031	19,47	1,265	3197,42
21	25,80	372,63	0,0000231	0,688	0,00268	7976063045,77	5487531375,49	0,333	0,389	686,13	0,032	20,02	1,265	3732,17
22	25,80	382,58	0,0000243	0,687	0,00261	7995694688,39	5493042250,93	0,333	0,389	686,36	0,033	20,40	1,265	4316,84
23	25,80	392,53	0,0000255	0,686	0,00255	7943440162,49	5449199951,47	0,333	0,389	684,53	0,033	20,78	1,265	4920,71
24	25,90	400,18	0,0000263	0,685	0,00250	7903270872,96	5413740547,98	0,333	0,389	683,04	0,034	21,17	1,265	5417,83
25	25,90	406,74	0,0000270	0,685	0,00246	7855850855,47	5381257836,00	0,333	0,389	681,68	0,035	21,38	1,265	5825,14
26	25,90	412,14	0,0000278	0,684	0,00243	7662776837,25	5241339356,68	0,333	0,389	675,72	0,035	21,44	1,265	6134,05
27	26,00	418,24	0,0000284	0,683	0,00239	7635317362,48	5214921758,57	0,333	0,389	674,58	0,035	21,59	1,265	6504,05
28	25,90	449,61	0,0000315	0,681	0,00222	7283515134,72	4960073806,74	0,333	0,389	663,41	0,038	22,80	1,265	8683,67

Tabel 5.16. Fluxul de căldura transmis prin radiație de la gazele de ardere la probă.

Timp min	T <sub>g</sub> [K]	$\alpha_{\text{exces de aer}}$ [-]	V <sub>0</sub> [Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> ]	V <sub>CO2</sub> [Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> ]	V <sub>H2O</sub> [Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> ]	V <sub>N2</sub> [Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> ]	V <sub>g0</sub> [Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> ]	V <sub>g-real</sub> [Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup> ]	p <sub>CO2</sub> Pa	p <sub>H2O</sub> Pa	S <sub>g</sub> m	K <sub>g</sub>	ε <sub>g</sub>	ε <sub>r-gaz-solid</sub>	Q <sub>gaz-solid</sub> [W]
0	317,75	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	43,18087	0,023	0,049	1,54	0,168	0,228	0,215	-9
1	473,15	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	54,53695	0,019	0,039	1,54	0,137	0,190	0,181	502
2	580,15	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	62,35613	0,016	0,034	1,54	0,120	0,169	0,162	1133
3	727,75	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	73,14221	0,014	0,029	1,54	0,102	0,146	0,140	2580
4	751,25	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	74,85951	0,013	0,028	1,54	0,100	0,142	0,137	2766
5	795,55	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	78,09679	0,013	0,027	1,54	0,095	0,136	0,132	3242
6	873,85	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	83,81868	0,012	0,025	1,54	0,088	0,126	0,122	4289
7	884,25	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	84,57867	0,012	0,025	1,54	0,087	0,125	0,121	4038
8	898,35	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	85,60905	0,012	0,025	1,54	0,085	0,123	0,119	3774
9	921,65	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	87,31173	0,012	0,024	1,54	0,083	0,120	0,117	3672
10	930,55	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	87,96211	0,011	0,024	1,54	0,083	0,119	0,116	3282
11	948,45	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	89,27018	0,011	0,024	1,54	0,081	0,117	0,114	3040
12	951,95	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	89,52595	0,011	0,024	1,54	0,081	0,117	0,113	2562
13	955,75	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	89,80364	0,011	0,024	1,54	0,080	0,116	0,113	2145
14	981,35	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	91,6744	0,011	0,023	1,54	0,078	0,113	0,110	2394
15	988,95	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	92,22978	0,011	0,023	1,54	0,078	0,113	0,110	2219
16	997,15	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	92,829	0,011	0,023	1,54	0,077	0,112	0,109	2087
17	1005,85	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	93,46477	0,011	0,023	1,54	0,076	0,111	0,108	2016
18	1019,25	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	94,44399	0,011	0,023	1,54	0,075	0,109	0,106	2131
19	1031,65	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	95,35014	0,011	0,022	1,54	0,074	0,108	0,105	2203
20	1046,85	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	96,4609	0,010	0,022	1,54	0,073	0,106	0,104	2383
21	1044,65	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	96,30014	0,010	0,022	1,54	0,073	0,107	0,104	2012
22	1071,75	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	98,28051	0,010	0,022	1,54	0,071	0,104	0,101	2580
23	1075,25	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	98,53627	0,010	0,022	1,54	0,071	0,103	0,101	2453
24	1082,05	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	99,03319	0,010	0,021	1,54	0,070	0,103	0,100	2478
25	1092,95	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	99,82973	0,010	0,021	1,54	0,070	0,102	0,099	2640
26	1096,75	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	100,1074	0,010	0,021	1,54	0,069	0,101	0,099	2603
27	1104,95	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	100,7066	0,010	0,021	1,54	0,069	0,100	0,098	2673
28	967,05	1,98	9,496	1,01	2,127	7,507	10,644	90,6294	0,011	0,023	1,54	0,079	0,115	0,112	-1758

Tabel 5.17. Fluxul de căldura transmis prin radiație de la pereții cuptorului la proba de testare.

Timp min	$T_{pi-proba}$ [K]	$T_{pi-cuptor}$ [K]	$\epsilon_{pereti-proba}$	$Q_{radiatie\ pereti}$ [W]
0	322,38	321,23	0,48	-5
1	327,45	356,01	0,48	158
2	355,72	476,21	0,48	1228
3	396,08	561,83	0,48	2601
4	441,43	619,63	0,48	3795
5	489,58	676,79	0,48	5283
6	554,03	767,31	0,48	8753
7	618,72	817,13	0,48	10377
8	677,70	847,49	0,48	10573
9	729,73	872,13	0,48	10227
10	771,92	893,65	0,48	9804
11	813,18	925,13	0,48	10237
12	843,68	941,55	0,48	9683
13	868,93	955,67	0,48	9155
14	889,22	971,31	0,48	9184
15	906,22	980,55	0,48	8669
16	921,55	996,67	0,48	9206
17	934,65	1005,09	0,48	8925
18	945,85	1018,35	0,48	9538
19	957,62	1031,13	0,48	10039
20	968,75	1045,19	0,48	10841
21	979,65	1053,61	0,48	10793
22	990,97	1062,31	0,48	10720
23	999,48	1073,05	0,48	11369
24	1006,53	1080,91	0,48	11744
25	1013,72	1091,87	0,48	12666
26	1019,40	1095,59	0,48	12513
27	1026,60	1103,57	0,48	12915
28	1022,60	1017,13	0,48	-805



Referitor la valorile fluxurilor de căldură obținute prin calcul, pot fi făcute următoarele comentarii:

- fluxul de căldură acumulat în probă (tabelul 5.14), înregistrează valori mari în intervalul de timp min 2 – min 6, după care aceste valori au fluctuații cuprinse între 64kW (în minutul 8) și 8kW (minutul 26);
- fluxul de căldură transmis de la probă la mediul exterior (tabelul 5.15), înregistrează valori crescătoare în intervalul de timp 1 minut – 27 minute. Sensul este unul credibil având în vedere faptul că temperatura pe fața neexpusă a probei crește în același interval de timp. Valoarea maximă a fluxului de căldură transferat prin convecție de la probă la mediul exterior este de 6504W, valoare înregistrată în minutul 27;
- fluxul de căldură transmis de la gazele de ardere la probă, conform valori cuprinse în tabelul 5.16, valorile fluxurilor de căldură transmis prin radiație de gazele de ardere probei de testat înregistrează creșteri în intervalul de timp min. 1 respectiv min. 6, după care aceasta înregistrează scăderi până în min. 15. În intervalul de timp min. 15 - min. 27 fluxul de căldură înregistrează fluctuații în intervalul 2016W – 2673W. Aceste ale fluxului de căldură sunt justificate de valorile temperaturilor gazelor de ardere și respectiv a temperaturii probei pe fața neexpusă la foc, corespunzătoare intervalului de timp menționat;
- fluxul de căldură transmis prin radiație de la pereții cuptorului la probă (tabelul 5.17), a fost determinat cu valori ale coeficientului de emisivitate rezultat din calcul cu relația 5.35 din capitolul 5.5.3.

Pentru a căpăta încredere în valorile măsurate și calculate s-a efectuat bilanțul privind fluxurile de căldură primite respectiv cedate de către proba de testare. În acest sens a fost utilizată ecuația 5.2. punctul 5.5.

În tabelul 5.18 sunt prezentate în paralel valorile fluxurilor de căldură schimbate de proba de testare pe cele două fețe, respectiv expusă și neexpusă la foc.

Tabel 5.18. Verificare bilanț pe cele doua fete ale cuptorului.

Timp	$Q_{\text{gaz-solid}}$	$Q_{\text{radiatie pereti}}$	Bilanț 1	$Q_{\text{cv}}$	$Q_{\text{acumulat}}$	Bilanț 2	Abaterea B1/B2
[min.]	[W]	[W]		[W]	[W]		%
0	-9	-5	-15	1	415	416	29,25
1	502	158	661	1	73468	73469	-110,21
2	1133	1228	2361	1	253213	253214	-106,23
3	2580	2601	5182	1	180190	180191	-33,78
4	2766	3795	6560	2	121759	121761	-17,56
5	3242	5283	8525	3	120546	120549	-13,14
6	4289	8753	13041	6	190533	190540	-13,61
7	4038	10377	14415	14	104982	104997	-6,28

8	3774	10573	14348	163	64122	64285	-3,48
9	3672	10227	13899	348	52099	52447	-2,77
10	3282	9804	13085	669	45588	46257	-2,53
11	3040	10237	13277	1056	66410	67466	-4,08
12	2562	9683	12245	1368	34650	36018	-1,94
13	2145	9155	11300	1506	29820	31325	-1,77
14	2394	9184	11578	1555	33017	34572	-1,99
15	2219	8669	10888	1712	19574	21287	-0,96
16	2087	9206	11293	1912	34051	35963	-2,18
17	2016	8925	10941	2158	17880	20038	-0,83
18	2131	9538	11669	2418	28079	30497	-1,61
19	2203	10039	12242	2779	27110	29888	-1,44
20	2383	10841	13224	3197	29795	32992	-1,49
21	2012	10793	12805	3732	18044	21776	-0,70
22	2580	10720	13299	4317	18565	22882	-0,72
23	2453	11369	13822	4921	22803	27723	-1,01
24	2478	11744	14222	5418	16732	22150	-0,56
25	2640	12666	15306	5825	23200	29025	-0,90
26	2603	12513	15116	6134	8007	14141	0,06
27	2673	12915	15588	6504	17187	23691	-0,52
28	-1758	-805	-2563	8684	6482	15166	6,92

Analizând valorile obținute în urma efectuării bilanțurilor și a calculării abaterii dintre acestea, se constată că: excluzând primele cinci minute, când regimul este puternic nestaționar, se poate considera că între minutul 4 și minutul 28, abaterea este cuprinsă între -17,56 și 0,06 %, valori considerate de încredere.

În tabelul 5.19 sunt prezentate valorile temperaturii de aprindere a peretelui din lemn, calculate cu relația 5.51, prezentată la punctul 5.5.6. În același tabel sunt prezentate valorile calculate ale coeficientului de radiație a gazelor (relația 5.40); coeficientul convectiv de transfer de căldură de la gaz la perete (relația 5.49); precum și coeficientul global de transfer de căldură de la fața expusă la fața neexpusă la foc (relația 5.48).

Analizând tabelul 5.19 se observă că valorile temperaturilor calculate pe fața neexpusă la foc a probei sunt crescătoare în intervalul de timp supus testării, min. 0 – min. 27. Din tabel se poate observa că valorile temperaturilor calculate sunt superioare, în medie, cu 10 grade, față de cele măsurate.

Tabel 5.19. Determinarea prin calcul a temperaturii de aprindere a plăcii de lemn.

Timp [s]	T <sub>aer-ext.</sub> [°C]	T gaze- cuptor [°C]	T <sub>pi- cuptor</sub> [°C]	T <sub>pi- probă</sub> [°C]	α gaz [W/mp*K]	α ext. [W/mp*K]	Σ(δi/λ i) [W/mp*K]	α cv [W/mp*K]	k perete [W/mp*K]	ΔT [°C]	T perete ext. [°C]
0	25,60	44,6	48,08	49,23	2,03	0,829	1,6863	1,6863	0,291	19,000	-34
1	25,60	200	82,86	54,30	3,45	0,817	1,149	2,0228	0,317	174,400	31
2	25,60	307	203,06	82,57	5,05	0,823	1,149	3,7182	0,353	281,400	33
3	25,60	454,6	288,68	122,93	7,78	0,904	1,149	5,7260	0,391	429,000	33
4	25,60	478,1	346,48	168,28	8,93	0,995	1,149	7,7690	0,418	452,500	39
5	25,60	522,4	403,64	216,43	10,60	1,135	1,149	10,2948	0,450	496,800	40
6	25,70	600,7	494,16	280,88	13,41	1,313	1,149	14,9719	0,487	575,000	42
7	25,60	611,1	543,98	345,57	15,21	1,559	1,149	19,0809	0,524	585,500	45
8	25,70	625,2	574,34	404,55	17,11	10,120	1,149	22,7186	0,741	599,500	49
9	25,70	648,5	598,98	456,58	19,13	12,304	1,149	26,2033	0,757	622,800	59
10	25,70	657,4	620,50	498,77	20,69	14,307	1,149	29,3806	0,768	631,700	73
11	25,70	675,3	651,98	540,03	22,47	15,522	1,149	33,3612	0,776	649,600	85
12	25,70	678,8	668,40	570,53	23,67	16,469	1,149	36,0951	0,781	653,100	105
13	25,70	682,6	682,52	595,78	24,71	16,827	1,149	38,5076	0,784	656,900	107
14	25,70	708,2	698,16	616,07	25,99	16,951	1,149	40,8144	0,787	682,500	109
15	25,80	715,8	707,40	633,07	26,82	17,218	1,149	42,5489	0,789	690,000	115
16	25,80	724	723,52	648,40	27,60	17,542	1,149	44,7117	0,791	698,200	125

Facultatea de Instalatii  
Catedra de Termotehnica

UTCB

TEZA DE DOCTORAT

CAPITOLUL

17	25,70	732,7	731,94	661,50	28,31	17,972	1,149	46,2236	0,793	707,000	130
18	25,80	746,1	745,20	672,70	29,03	18,323	1,149	47,9964	0,794	720,300	142
19	25,80	758,5	757,98	684,47	29,76	18,977	1,149	49,8186	0,797	732,700	168
20	25,90	773,7	772,04	695,60	30,51	19,466	1,149	51,7399	0,798	747,800	170
21	25,80	771,5	780,46	706,50	30,96	20,023	1,149	53,2370	0,800	745,700	190
22	25,80	798,6	789,16	717,82	31,93	20,404	1,149	54,8185	0,802	772,800	217
23	25,80	802,1	799,90	726,33	32,38	20,785	1,149	56,3783	0,803	776,300	230
24	25,90	808,9	807,76	733,38	32,81	21,174	1,149	57,6044	0,804	783,000	245
25	25,90	819,8	818,72	740,57	33,32	21,380	1,149	59,1259	0,805	793,900	251
26	25,90	823,6	822,44	746,25	33,65	21,439	1,149	59,9168	0,805	797,700	265
27	26,00	831,8	830,42	753,45	34,12	21,586	1,149	61,2167	0,806	805,800	278
28	25,90	693,90	743,98	749,45	31,65	22,797	1,149	53,6762	0,804	668,000	-73,647

## Cap. 6. VALIDAREA MODELULUI TEORETIC PRIVIND PROCESELE DE TRANSFER DE CĂLDURA PRIN RADIAȚIE

### 6.1. Validarea experimentală a temperaturii de aprindere a probei din lemn.

Valorile temperaturilor de aprindere calculate și a celor măsurate, precum și abaterea dintre acestea, sunt prezentate în tabelul 6.1.

Tabelul 6.1. Abaterea temperaturii de aprindere calculată vs. măsurată, în intervalul de timp 0 ÷ 27 minute.

Timp [min]	T perete ext. Calculat [°C]	T perete ext. Măsurat [°C]	Abaterea Relativă [-]	Abaterea Absoluta [°C]
0	-34	26	1,763094	-61
1	31	26	0,155914	5
2	33	26	0,206566	7
3	33	26	0,198485	7
4	39	27	0,311538	12
5	40	28	0,307083	12
6	42	30	0,297619	13
7	45	33	0,272222	12
8	49	38	0,214966	11
9	59	48	0,185593	11
10	73	63	0,141553	10
11	85	79	0,064902	6
12	105	91	0,129841	14
13	107	96	0,098754	11
14	109	98	0,099083	11
15	115	104	0,092029	11
16	125	112	0,1044	13
17	130	121	0,072179	9
18	142	130	0,083568	12
19	168	142	0,15744	26
20	170	156	0,083824	14
21	190	173	0,088684	17
22	217	193	0,109587	24
23	230	213	0,07413	17
24	245	228	0,068707	17
25	251	241	0,038712	10
26	265	252	0,048742	13
27	278	264	0,0497	14

Abaterea temperaturii de aprindere calculată față de cea măsurată este ilustrată grafic în figura 6.1.

Din figura 6.1. se poate observa că variația în timp a temperaturii calculate și a celei măsurate este crescătoare iar abaterea dintre ele fiind aproximativ aceeași pe toată perioada de testare. Abaterea medie absolută, exprimată în °C, este de 13°C. această abatere reprezentând în fapt o abatere relativă acceptabilă pentru intervalul de timp min.10 și min.27.

În figura 6.1. sunt prezentate grafic temperaturile de calcul vs. Temperaturi măsurate ale peretelui.

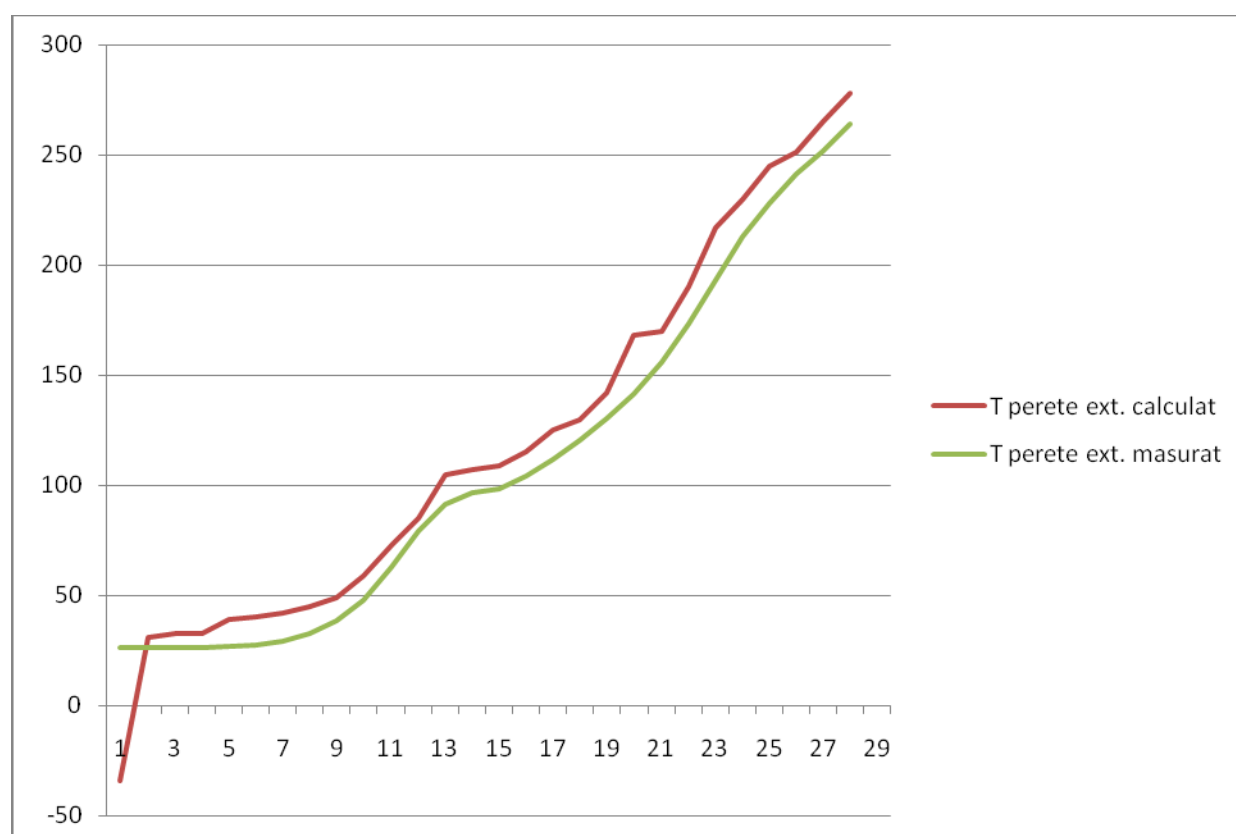


Fig. 6.1. Temperatura de aprindere măsurată vs. calcul.

## 6.2. Validarea modelului matematic privind transferul de căldură prin radiație de la pereții cuptorului la proba supusă la foc, utilizând coeficienții Poleak.

Analizând valorile obținute prin simulare numerică se observă că este îndeplinită condiția referitoare la: **suma coeficienților Poleak, care se raportează la o suprafața închisă, este egală cu 1.**

Pe baza valorilor factorilor de formă rezultați prin simulare numerică și prezentați în tabelul 4.1. din capitolul 4 s-a determinat fluxul de căldură transferat prin radiație de la pereții cuptorului la proba de testare. În tabelul 6.2. sunt prezentate valorile simulate și cele rezultate din experiment.

Tabel 6.2. Fluxul de căldură transferat prin radiație calcul vs. Experiment.

Timpul [min]	$Q_{\text{radiație pereti}}$ [W] Predicția modelului	$Q_{\text{radiație pereti}}$ [W] Calculat cu valori măsurate	Abatere [%] Calculat vs. Măsurat
0	129	158	-22,48
1	1058	1228	-16,07
2	2294	2601	-13,38
3	4851	3795	21,77
4	7385	5283	28,46
5	10693	8753	18,14
6	12947	10377	19,85
7	13192	10573	19,85
8	16874	10227	39,39
9	11135	9804	11,95
10	13169	10237	22,26
11	11050	9683	12,37
12	11767	9155	22,20
13	11272	9184	18,52
14	10224	8669	15,21
15	11977	9206	23,14
16	10195	8925	12,46
17	11877	9538	19,69
18	12664	10039	20,73
19	13416	10841	19,19
20	13528	10793	20,22
21	13281	10720	19,28
22	14062	11369	19,15
23	13376	11744	12,20
24	14068	12666	9,97
25	14684	12513	14,78
26	14392	12915	10,26
27	1000	-805	180,50

## Cap. 7. Concluzii

Data fiind noua abordare europeană, care impune modificarea concepției în vigoare privind proiectarea, verificarea și urmărirea în exploatare a construcțiilor, elementelor de construcții și a materialelor, în scopul asigurării siguranței cetățeanului, impun efectuarea de încercări de rezistență la foc a acestora, în vederea cunoașterii timpului și temperaturii de aprindere.

În același timp, lucrarea își propune realizarea de analize a incendiului din punct de vedere termodinamic, considerând incendiul ca un proces complex de ardere, cu evoluție nedeterminată, incluzând și alte fenomene de natură fizică, chimică, biologică (transfer de căldură, schimbul de gaze cu mediul înconjurător, formarea flăcărilor, transformări structurale produse în materialele și elementele de construcții), care acționează asupra construcțiilor, instanțiilor și utilizatorilor putând produce multiple efecte negative.

În ce privește modelarea matematică, doctorandul propune un model care descrie fenomenele complexe de transfer de căldură, în regim nestaționar. Modelul matematic surprinde procese de transfer de căldură și de acumulare de căldură, funcție de temperatura momentanee impusă mediului din cuptor. Cuptorul de testare fiind un sistem radiant închis de suprafețe, modelarea transferului de căldură prin radiație între suprafețele cuptorului se realizează apelând la metoda teoriei Poleak.

### **Modelul matematic are în vedere următoarele particularități:**

- pereții interiori incintei cuptorului sunt considerați o suprafață izotermă și în consecință transferul de căldură prin radiație este uniform. Această ipoteză fiind justificată de faptul că incinta este de dimensiuni mari, cu pereți de structură identică, la care existența unei flăcări de combustibil gazos și cu debit mic de combustibil, nu aduce perturbări izotermicității cuptorului. În sprijinul acestei ipoteze este și faptul că debitul mediu de combustibil gazos al arzătoarelor este de  $B = 400 \text{ m}^3/\text{h}$ , rezultând o putere calorică de  $H_i = 35500 \text{ kJ}/\text{Nm}^3$  și volumul cuptorului de  $V = 13 \text{ m}^3$ , reprezintă o încărcare termică volumetrică  $Q_v = B \cdot H_i / 3600 / V = 6.11 \text{ kW}/\text{m}^3$ , încărcare termică care poate fi neglijabilă față de încărcarea uzuală de  $300 \text{ kW}/\text{m}^3$  a unui cuptor de încălzire. Concluzia este că un astfel de proces redus de ardere nu va crea neuniformități termice sesizabile în interiorul cuptorului, ceea ce s-a constatat și experimental;

- sursa de încălzire a cuptorului este radiația gazelor de ardere din volumul cuptorului, debitul de combustibil fiind variat automat pentru respectarea curbei standard de ridicare a temperaturii în cuptor;

- suprafața receptoare de căldură utilă a cuptorului este peretele din față al cuptorului (peretele de probă / peretele suport) compus dintr-un perete cadru de construcție în care este încastrat elementul de construcție încercat. Atât peretele suport cât și proba de încercare au caracteristici termo-fizice diferite: coeficient de emisie, conductibilitate termică, căldură specifică, deci aceste suprafețe se constituie în suprafețe diferite termic de incinta de pereți ai cuptorului;

- întregul sistem funcționează în regim nestaționar, *existând o curbă temperatură-timp care trebuie respectată în timpul probei*. Cuptorul pornește de la rece și se încălzește apoi într-un timp dat până la temperatura maximă de încercare a probei.



**În urma simulărilor numerice a rezultat următoarele:**

- valorile coeficienților de formă calculați îndeplinesc condiția că suma coeficienților Poleak, care se raportează la o suprafața închisă, este egală cu 1.

**În urma experimentărilor s-au desprins următoarele aprecieri calitative, după cum urmează:**

- proba a fost montată pe peretele suport fără modificarea integrității acesteia cu suficient timp înainte de începerea experimentărilor, respectând timpul impus de standard, pentru condiționarea probei;

- temperatura înregistrată în interiorul cuptorului a urmărit curba standard temperatură-timp, impusă;

- temperaturile au fost înregistrate și vizualizate în timp real, la un interval de 1 minut, temperaturile măsurate au înregistrat creșteri în timp, valorile obținute fiind unele firești;

- nu au fost vizualizate fisuri la nivelul probei de testat până la momentul inițierii arderii (incendiului);

- nu au fost înregistrate deteriorări ale peretelui suport pe care s-a montat proba de testare;

- temperaturile pe suprafețele exterioare ale cuptorului nu au depășit valoarea de 30°C, valoare impusă de norme privind securitatea de exploatare a acestor standuri de testare (cuptoare).

**Rezultatele experimentale au evidențiat următoarele:**

- valorile temperaturii gazelor de ardere sunt superioare temperaturii medii a peretelui interior al cuptorului, până la minutul 20, după care cele două valori devin apropiate;

- temperaturile corespunzătoare celor cinci puncte de măsură, aferente peretelui opus de testare, în intervalul de timp min. 1 ÷ min. 28, urmăresc curba standard a temperaturii în timp ( $T_{med}$ ). Aceste valori se încadrează între valorile minime ( $T_{min.}$ ) și valorile maxime ( $T_{max.}$ ), impuse de standard. Acest aspect evidențiază faptul că automatizarea funcționării cuptorului a răspuns cerințelor standard;

- temperatura medie a feței expuse (la foc) a probei, calculată așa cum s-a menționat anterior, are valori inferioare temperaturii medii a peretelui opus și a gazelor de ardere;

- temperatura medie a feței neexpuse (la foc) a probei, calculată așa cum s-a menționat anterior, are valori inferioare temperaturii medii a feței expuse;

- temperaturile înregistrate de senzorii montați pe fața neexpusă a probei, la interfața dintre vata minerală și lemn, sunt cu mult mai mici decât în cazul temperaturilor măsurate pe fața metalică. Fapt explicat de rezistența termică a stratului izolator (vata minerală cu grosimea de 50mm);

- temperaturile înregistrate de senzorii montați pe proba, la interfața dintre lemn și aerul din laborator, au o evoluție crescătoare de la temperatura medie de 20°C până la temperatura de 260°C, aspect vizualizat cu ajutorul camerei în infraroșu;

- valorile temperaturilor măsurate și celor medii calculate, pot fi considerate de încredere având în vedere că au valori care se înscriu pe deoparte în limitele curbelor standard și pe de altă parte în limitele precizate în derivatograma privind arderea lemnului;

- temperatura în fiecare strat component are o variație liniară și în consecință se poate aprecia că proba poate fi asimilată ca un perete plan, compus din trei straturi omogene, cu conductivitate termică diferită. Variație mare de temperatură este înregistrată în stratul de termoizolație, aspect susținut de studiile teoretice, din literatură.

**În ce privește mărimile calculate pe baza datelor experimentale s-au evidențiat următoarele:**

- fluxul de căldură acumulat în probă (tabelul 5.14), înregistrează valori mari în intervalul de timp min 2 – min 6, după care aceste valori au fluctuații cuprinse între 64kW (în minutul 8) și 8kW (minutul 26);

- fluxul de căldură transmis de la probă la mediul exterior (tabelul 5.15), înregistrează valori crescătoare în intervalul de timp 1 minut – 27 minute. Sensul este unul credibil având în vedere faptul că temperatura pe fața neexpusă a probei crește în același interval de timp. Valoarea maximă a fluxului de căldură transferat prin convecție de la probă la mediul exterior este de 6504W, valoare înregistrată în minutul 27;

- fluxul de căldură transmis de la gazele de ardere la probă, conform valori cuprinse în tabelul 5.16, valorile fluxurilor de căldură transmis prin radiație de gazele de ardere probei de testat înregistrează creșteri în intervalul de timp min. 1 respectiv min. 6, după care aceasta înregistrează scăderi până în min. 15. În intervalul de timp min. 15 - min. 27 fluxul de căldură înregistrează fluctuații în intervalul 2016W – 2673W. Aceste ale fluxului de căldură sunt justificate de valorile temperaturilor gazelor de ardere și respectiv a temperaturii probei pe fața neexpusă la foc, corespunzătoare intervalului de timp menționat;

- fluxul de căldură transmis prin radiație de la pereții cuptorului la probă (tabelul 5.17), a fost determinat cu valori ale coeficientului de emisivitate rezultat din calcul cu relația 5.35 din capitolul 5.5.3.

Pentru a căpăta încredere în valorile măsurate și calculate s-a efectuat bilanțul privind fluxurile de căldură primite respectiv cedate de către proba de testare. Analizând valorile obținute în urma efectuării bilanțurilor și a calculării abaterii dintre acestea, se constata ca: excluzând primele cinci minute, când regimul este puternic nestabil, se poate considera ca între minutul 4 și minutul 28, abaterea este cuprinsă între -17,56 și 0,06%, valori considerate de încredere.

**În ce privește validarea temperaturii de aprindere s-au evidențiat următoarele:**

- temperatura de aprindere calculată, a peretelui din lemn are valori superioare celor măsurate cu cca. 13 grade. Aceasta conduce la o abatere relativă acceptabilă pentru intervalul de timp min.10 și min.27, de cca 10%;

**În ce privește validarea fluxului de căldură transmis prin radiație de la pereții incintei la proba de test:**

- valorile obținute prin simulare numerică confirmă teoria că: suma coeficienților Poleak, care se raportează la o suprafața închisă, este egala cu 1;
- valorile fluxului de căldură transmis prin radiație calculat pe baza coeficienților Poleak sunt superioare/inferioare celor rezultate prin experiment în medie cu 15%.

## CAP. 8. CONTRIBUȚII PERSONALE. ACȚIUNI DE VIITOR

### Contribuții personale:

Doctorandul a parcurs un volum mare de material documentar, pe care l-a analizat, structurat și interpretat. Astfel:

- a elaborat schemele logice pentru procesul de ardere și procesul de dezvoltare a incendiului.
- a identificat relația care descrie estimarea temperaturii gazelor de ardere deasupra focarului, dintr-o incintă.
- a identificat relația cu ajutorul căreia este estimată durata de timp necesară umplerii cu fum a încăperii.
- a identificat relațiile pentru calculul vitezei de ardere a materialelor combustibile solide, precum și relația ce descrie fluxul de căldură ce ajunge efectiv de la gazele de ardere la suprafața.
- a identificat fazele arderii.
- a stabilit mecanismul propagării fumului într-o incintă și identifica relații experimentale pentru estimarea temperaturii gazelor de ardere deasupra focarului și estimarea duratei de timp necesare umplerii cu fum a volumului încăperii incendiate.
- a identificat parametrii termodinamici care descriu mediul gazos, precum și relațiile de calcul ale acestora.
- a stabilit un sistem de ecuații care descrie modul general de propagare a arderii în faza de dezvoltare a unui incendiu. Sistemul de ecuații servește la determinarea debitului de gaze din incintă.
- a descrie o ecuație simplificată pentru bilanțul energetic pentru o flacără ascendentă. Ecuația de bilanț include pe deoparte fluxul de căldură pierdut prin transport de masă prin deschideri și fluxul de căldură transmis prin radiație, prin suprafețele interioare ale incintei, iar pe de altă parte fluxul de căldură degajat prin arderea combustibilului.
- a definește mărimile adimensionale pentru parametrii care intervin în sistemul de ecuații care descrie modul general de propagare a arderii în faza de dezvoltare a unui incendiu. Aceste mărimi adimensionale servesc la scrierea ecuației de determinare a debitului masic de gaze evacuat din incintă, sub formă de ecuație diferențială.
- a identificat relațiile criteriale care descriu fenomenul de ardere în timpul incendiului (Froude, Reynolds, Grashof).
- a identificat și prezentat un model experimental simplu (din literatură), pentru studiul temperaturii gazelor de ardere rezultate în urma arderii lemnului, la diferite valori ale schimburilor orare de aer.
- a analizat rezultatele obținute experimental vs. teoretic privind temperatura gazelor de ardere, respectiv creșterea de temperatură pe verticală într-o incintă ventilată și neventilată.

La realizarea modelului experimental doctorandul a avut următoarele contribuții:

- a proiectat și a urmărit fazele de execuție a standului experimental. Această activitate a fost validată de o comisie formată din specialiști din domeniu (Ministerul de Interne, UTCB,

MDRT, Facultatea de Pompieri). Ulterior omologării, standul experimental a fost evaluat de către Asociația de Acreditare din România – RENAR, care a acreditat un număr de 6 încercări.

- a organizat și condus cercetările experimentale efectuate pe cuptorul menționat.

- a creat o bază de date experimentale privind încercările de rezistență la foc a pereților verticali neomogeni.

La modelarea matematică doctorandul a avut următoarele contribuții:

- a identificat ecuațiile care alcătuiesc modelul matematic pentru procesul de transfer de căldură prin radiație de la pereții incintei la elementul de construcție.

- a determinat prin calcul temperatura suprafeței interioare și exterioare a probei, funcție de timp, în condițiile unei incinte de testare în care temperatura este progresiv ridicată conform unei curbe standard;

Doctorandul a elaborat un număr de 12 lucrări științifice care au fost publicate în manifestări științifice Naționale (acestea se regăsesc în capitolul 9, referitor la bibliografie).

### **Ațiuni de viitor**

Doctorandul își propune continuarea cercetărilor pentru:

- modelarea procesului complex de transfer de căldură dintre pereții incintei cuptorului, gazelor de ardere și a convecției, pe fața expusă a probei;

- modelarea procesului complex de transfer de căldură dintre peretele neexpus și mediul exterior;

- efectuarea de încercări de rezistență la foc și modele matematice pentru diferite materiale și diferite elemente de construcție structurale.

## CAP. 9. BIBLIOGRAFIE

- 1 N. ANTONESCU           Procese și instalații de ardere - Inst. de Construcții – 1982.
- 2 N. ANTONESCU           Cazane și aparate termice - Editura Didactică și Pedagogică-  
V. CALUIANU           1978.
- 3 F. CHIRIAC               Procese de transfer de căldură și masă în instalații industriale -  
A. LECCA               Ed. Tehnică -1982.  
N. ANTONESCU
- 4 F. CHIRIAC               Termotehnica. Transfer de căldură - Inst. de Construcții 1988.  
C. MIHĂILĂ
- 5 D. ȘTEFĂNESCU           Transfer de căldură și masă. Teorie și aplicații – Editura  
A. LECA               didactică și pedagogică, București - 1983.
- 6 D. ȘTEFĂNESCU, ș.a.     Bazele Termodinamicii – Editura Didactică și pedagogică.  
București – 1970.
- 7 N. ANTONESCU           Valorificarea energetică a deșeurilor – Editura Tehnică - 1988.  
R. POLIZU
- 8 V. CALUIANU             Aparate termice. Îndrumător de proiectare – Institutul de  
N. ANTONESCU         Construcții București – 1988.
- 9 P. D. STĂNESCU           Arderea peliculară a deșeurilor lichide –Matrix Rom București –  
2001.
- 10 N. ANTONESCU           Procese de ardere. Bazele fizice și experimentale – Matrix Rom  
P. D. STĂNESCU         București – 2002.  
N. N. ANTONESCU
- 11 R. DUMITRESCU         Lecții de termodinamică și transfer de căldură – Editura  
F. CHIRIAC             Conspress București – 2010.
- 12 A. BEJAN                 Convection heat Transfe – Editura John Wilez&Sons – New York  
– 1984.
- 13 CARABOGDAN            Bazele teoretice ale aprinderii și arderii combustibililor solizi -

- 
- |  |  |
|--|--|
| N. PĂNOIU  | Ed. Academiei – 1969.  |
| 14 C. CÂRLOGANU                                      | Combustii rapide în gaze și pulberi - Ed. Tehnică - 1986.  |
| 15 HAMBURGER   | Introducere în teoria propagării căldurii - Ed. Academiei - 1956.  |
| 16 C. MIHĂILĂ  | Procese termodinamice în sisteme gaz-solid și aplicațiile lor în industrie - Ed. Tehnică 1982.                                 |
| 17 N. LEONĂCHESCU                                    | Termotehnica - Editura Didactică și Pedagogică – 1981.   |
| 18 B. POPA   | Transfer de căldură în procese industriale - Ed. Dacia. Cluj-1976.   |
| 19 B. POPA   | Termotehnica - Ed. Didactică și Pedagogică-1985.   |
| C. VINTILĂ   |  |
| 20 M. MIKHEYEV                                       | Fundamentals of Heat Transfer. MIR Publishers, Moscova, 1977   |
| 21 H. Tolle  | Măsurări în instalațiile termice - Editura tehnică București 1972  |
| 22 Isacenco, V.P.<br>Osipova, V.A.<br>Sukomel, A. S. | 1977. Heat transfer. Mir Publishes, 1977 Moscow.   |
| 23 Ștefănescu, D.                                    | Transferul de căldură în tehnică, Culegere de probleme pentru ingineri, Editura Tehnică București, vol.1/1982.                 |
| 24 S. CALOTĂ   | Elemente de teoria arderii și propagării incendiului - Ed. M. I. 1990.   |
| 25 S. CALOTĂ   | Noua Clasificare Europeană a Produselor Pentru Construcții din Punct de Vedere al Rezistenței la Foc – 1992 – București.       |
| 26 J.O'CONNOR  | Practical fire and arson investigation - ED.CRC Press Boca Raton - Florida U.S.A. 1993.  |
| 27 L. AMY  | L' incendie - Ed. Dounod , Paris 1971.   |
| 28 J. H. Mc. GIRE                                    | Heat transfer by radiation-HMS Stationery Office-London, 1953.   |
| 29 NFPA-901  | Uniform Coding for Fire Protection – ed. 1993  |
| 30 ***   | Normativ de siguranță la foc a construcțiilor P-118 – 1999.  |
| 31 ***   | Norme tehnice pentru ignifugarea materialelor și produselor combustibile din lemn și textile utilizate în construcții C58-'99. |
| 32 SR 652  | Lemn, placaj, plăci de așchii de lemn și plăci de fibre de lemn - Eficiența ignifugării.                                       |

- 
- |    |   |  |
|----|---|--|
| 33 | SR 7248   | Metodă de determinare a propagării flăcării pe suprafața materialelor combustibile folosite în construcții   |
| 34 | SR ISO 8421/1   | Protecția împotriva incendiilor. Vocabular. Termeni generali și fenomene ale incendiului.  |
| 35 | SR+EN ISO13943  | Siguranța la foc – Vocabular.  |
| 36 | ISO 3261  | Fire tests - Vocabulary  |
| 37 | IEC Guide 52  | Glossary of fire terms and definitions   |
| 38 | N.N. Antonescu<br>N. ANTONESCU<br>P.D. STANESCU                   | Modelare fizico-matematica a încercării la foc a elementelor de construcție. București 2011.   |
| 39 | Teză doctorat<br>STĂNESCU Paul-Dan                                | Contribuții la studiul arderii peliculare a combustibililor lichizi. București 1998  |
| 40 | Teză doctorat N. N.<br>ANTONESCU                                  | Procese energo-economice cu poluare redusă în arderea deșeurilor menajere și industriale solide. București 1999.   |
| 41 | CALOTĂ Sorin  | Contribuții la evoluția termodinamică a incendiului într-o incintă. București 2003.  |
| 42 | V. CUBLESAN   | „Norme de incercare a echipamentelor pentru constructii, din punct de vedere al rezistentei la foc” – Timisoara 2009 – A 18-a Editie Instalatii Pentru Constructii si Confortul Ambiental.   |
| 43 | V. CUBLESAN   | „Testarea rezistentei la foc a echipamentelor de instalatii aferente cladirilor. Conditii de testare” – Timisoara 2009 – A 18-a Editie Instalatii Pentru Constructii si Confortul Ambiental.   |
| 44 | V. CUBLESAN   | “Concepții europene privind ingineria siguranței la incendiu”, Conferinta nationala cu participare internationala “Instalatii pentru Constructii si confortul ambiental”, editia a XIV, ISBN 973-625-223-X, (14÷15) aprilie 2005, Timisoara, pag. 79-84. |
| 45 | Dr. ing. Sorin<br>CALOTĂ, prep. Msc.<br>ing. Valentin<br>CUBLEȘAN | „Noua Clasificare Europeană a Produselor Pentru Construcții din Punct de Vedere al Rezistenței la Foc” Conferința a IX-a “Eficiență, Confort, Conservarea Energiei și Protecția Mediului” – BIRAC 2002, București, 27-30 noiembrie.                      |
| 46 | V. CUBLESAN   | „Cuptor de testare la foc” Conferința a VIII-a “Eficiență, Confort, Conservarea Energiei și Protecția Mediului” – BIRAC 2001, București, 27-30 noiembrie.  |



- 
- 47 V. CUBLESAN „Distribuția Temperaturilor în Camere cu Ventilare Forțată” Conferința a VIII-a “Eficiență, Confort, Conservarea Energiei și Protecția Mediului” – BIRAC 2001, București, 27-30 noiembrie.
- 48 prep. drd. ing. Stand experimental pentru testarea rezistenței la foc a materialelor de construcții. Conferința Instalații pentru Construcții și Confortul Ambiental – Timisoara, 22 – 23 aprilie, 2004, ISBN 973-625-140-3 (pag.482 – 488)  
Valentin Cublesan, s.l.  
dr. ing. Anica Ilie
- 50 Drd. ing. Valentin „Evoluția temperaturilor în camere cu ventilare forțată”, A XIV-a Conferință cu participare internațională Instalații Pentru Construcții și Confortul Ambiental, 13-14 Aprilie 2005 – Timișoara.  
CUBLEȘAN, dr. ing.  
Rodica DUMITRESCU
- 51 Drd.ing.Valentin “Norme de încercare a produselor pentru construcții din punct de vedere al reacției la foc”, A XIV-a Conferință cu participare internațională Instalații Pentru Construcții și Confortul Ambiental, 13-14 Aprilie 2005 – Timișoara.  
CUBLEȘAN,  
Dr.ing.Sorin CALOTĂ
- 52 Drd. ing. Valentin “Conceptii europene privind ingineria siguranței la incendiu”, Conferința națională cu participare internațională “Instalații pentru Construcții și confortul ambiental”, editia a XIV, ISBN 973-625-223-X, (14÷15) aprilie 2005, Timisoara, pag. 79-84.  
CUBLEȘAN, Dr. ing.  
Anica ILIE
- 53 Prep. ing. Razvan „Rețele de discretizare adaptate modelelor de transfer dinamic și termic”, Conferința națională cu participare internațională “Instalații pentru Construcții și confortul ambiental”, editia a XV, ISBN 973-625-305-8, (10-13) aprilie 2006, Timisoara, pag. 71-83.  
STEFAN, prep. ing.  
Costin COSOIU, asist.  
ing. Valentin  
CUBLESAN, asit. ing.  
Elena SERBAN, prep.  
ing. Alexandru IATAN.
- 54 asit. ing. Elena „Metoda inversa in conductia caldurii-aplicatie numerica”, Conferința națională cu participare internațională “Instalații pentru Construcții și confortul ambiental”, editia a XV, ISBN 973-625-305-8, (10-13) aprilie 2006, Timisoara, pag. 84-95.  
SERBAN, prep. ing.  
Alexandru IATAN,  
prep. ing. Razvan  
STEFAN, asist. ing.  
Valentin CUBLESAN
- 55 Prep. ing. Razvan „Rețele de discretizare adaptate modelelor de transfer dinamic și termic”, Conferința națională cu participare internațională “Știința modernă și energia” - Cluj, 15-16 mai 2006, pag. 61-73.  
STEFAN, asist. ing.  
Valentin CUBLESAN,  
asit. ing. Elena  
SERBAN, prep. ing.  
Alexandru IATAN,  
prep. ing. Costin

## COSOIU

- 
- 56 Drd .ing. Valentin CUBLEȘAN, prof. dr. ing. Florea CHIRIAC „Sistem de testarea rezistenței la foc a materialelor și echipamentelor pentru construcții și instalații”, A X – a Conferință de Eficiență, Confort, Conservarea Energiei și Protecția Mediului, București, 28-29 nov. 2006 CD
- 57 V.D.I.-Warmatlas Capitolul Ge. Dusseldorf, 2009
- 58 Ion Asavinei  
Cornelia Niculescu Ghid pentru utilizarea termocuplelor în măsuratori industriali, Editura tehnica, București - 1981
- 59 ASHRAE Handbook 2010 Fundamentals American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. ASHRAE, New York, 2009, Ch.
- 60 SR EN 1634-1 : 2009 Teste de rezistență la foc și etanșitate la fum pentru uși, obloane, ferestre și elemente de feronerie; Partea 1 : Teste de rezistență la foc pentru uși, obloane și ferestre
- 61 SR EN 1364-1 - 2002 Incercări de rezistență la foc a elementelor neportante. Partea 1: Pereti
- 62 SR EN 1364-3 - 2007 Incercări de rezistență la foc a elementelor neportante. Partea 3: Fata de cortina
- 63 SR EN 1364-4 : 2008 Incercări de rezistență la foc a elementelor neportante. Partea 4: Pereti cortina - Detalii de configurație
- 64 SR EN 1363-1: 2001 Încercări de rezistență la foc – Partea 1: Cerințe generale.
- 65 SR EN 1363 - 2: 1999 Încercări de rezistență la foc – Partea 2: Proceduri alternative și suplimentare.
- 66 SR EN 1363 - 2: 1999 Încercări de rezistență la foc – Partea 2: Proceduri alternative și suplimentare.
- 67 SR EN 1363-3: 1999 Încercări de rezistență la foc – Partea 3: Verificarea performanței cuptorului.
- 68 SR EN 13943 : 2000 Siguranța la foc. Vocabular (ISO 13943 : 2000).
- 69 SR EN 13501-1:2007 Clasificare în funcție de comportarea la foc a produselor și elementelor de construcție. Partea 1: Clasificare folosind rezultatele încercărilor de reacție la foc
- 70 SR EN ISO 1366-3: 2009 Încercări de rezistență la foc pentru instalații tehnice: elemente pentru etanșarea trecerilor.

- 71 SR EN ISO 1366 - 4: 2006 Încercări de rezistență la foc pentru instalații tehnice: garnituri de îmbinare lineare.
- 72 SR EN ISO 1366 - 8:2007 Încercări de rezistență la foc pentru instalații tehnice: conducte pentru evacuarea fumului.
- 73 \*\*\* Regulamentul privind clasificarea și încadrarea proceselor pentru construcții pe baza performanțelor de comportare la foc, aprobat prin ordin MLPTL și Ministerul de Interne.
- 74 \*\*\* Manual de utilizare ALMEMO, editia 5, AHLBORN
- 75 \*\*\* Software AHLBORN pentru măsurarea, înregistrarea și prelucrarea datelor, versiunea 5/2010.



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

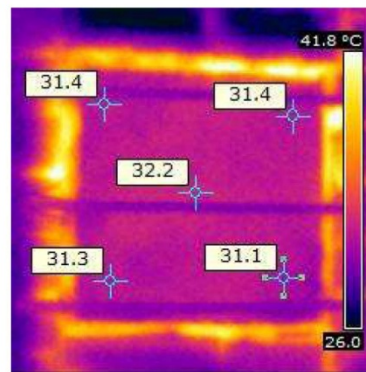
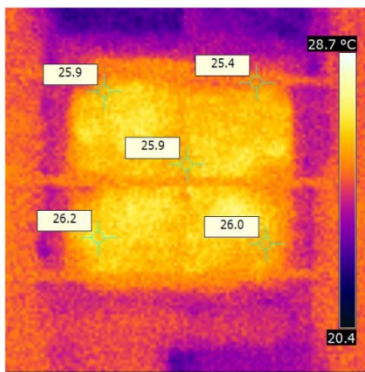


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 12:25:21	
Image Name	P2.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

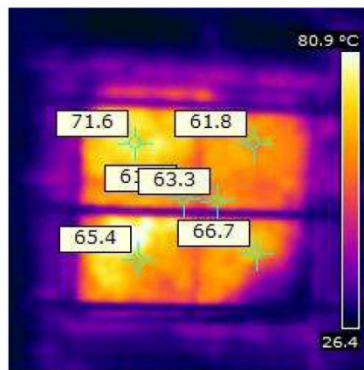
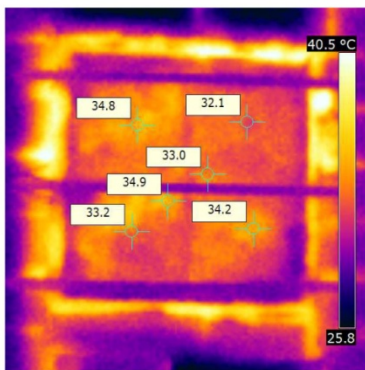


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 12:29:25	
Image Name	P4.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011

**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti

**Thermographer**

**Contact Person**

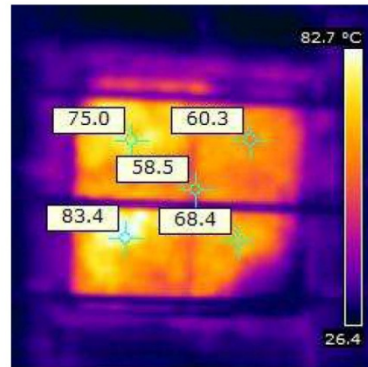
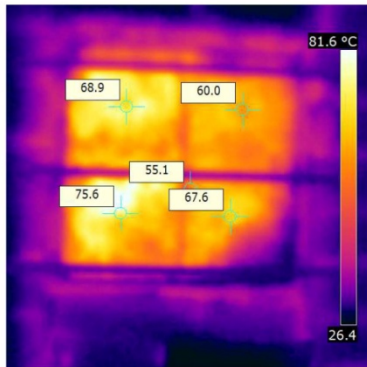


Image and Object Parameters	Text Comments
<b>Camera Model</b> FLIR InfraCAM Wester	
<b>Image Date</b> 2011:08:04 12:30:54	
<b>Image Name</b> P6.jpg	
<b>Emissivity</b> 0,93	
<b>Reflected Temperature</b> 20,0 °C	
<b>Object Distance</b> 2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

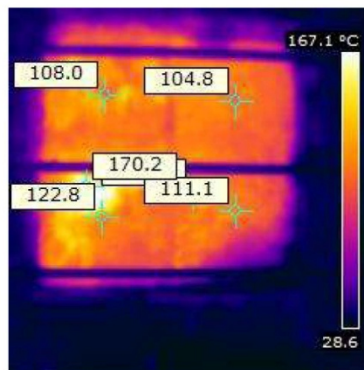
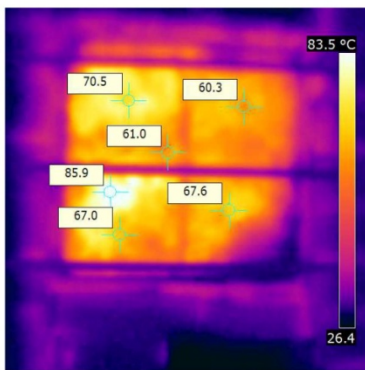


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:22:23	
Image Name	P8.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

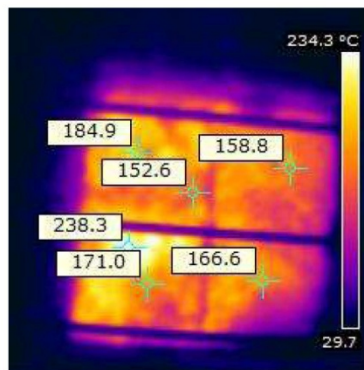
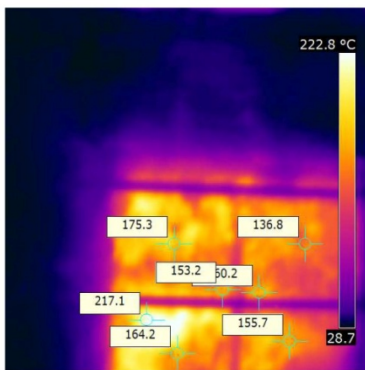


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 12:34:31	
Image Name	P10.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description





## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

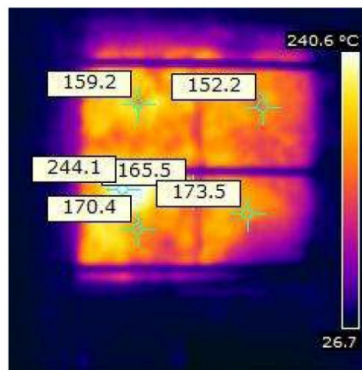
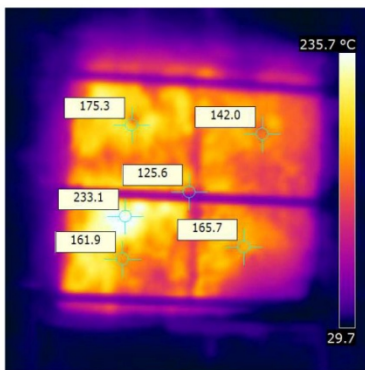


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 12:35:27	
Image Name	P12.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

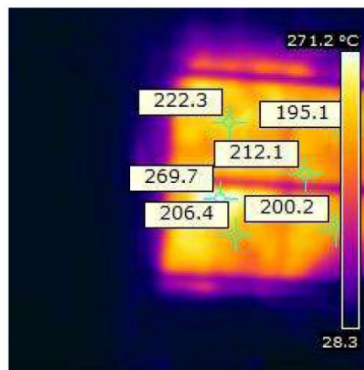
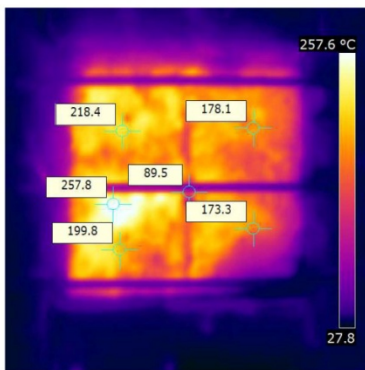


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 12:36:45	
Image Name	P14.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

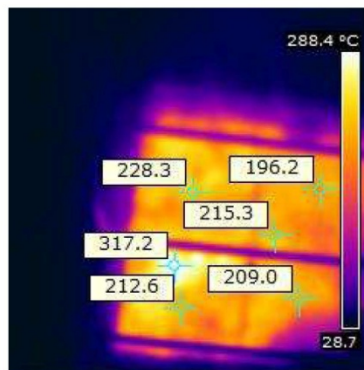
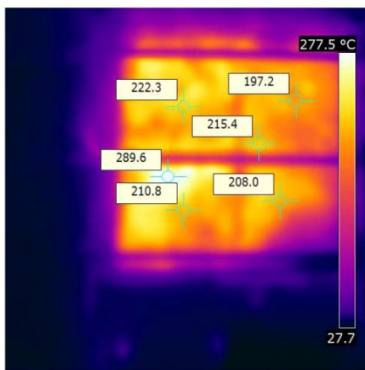


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:05:34	
Image Name	P16.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

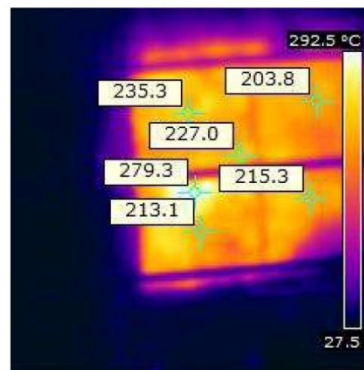
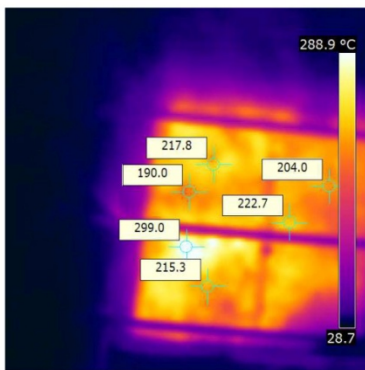


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:06:48	
Image Name	P18.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

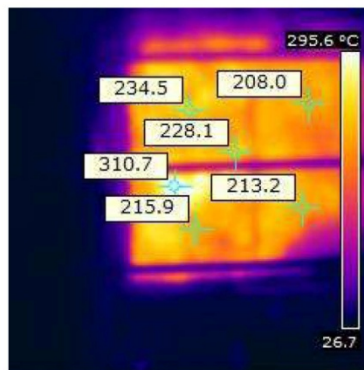
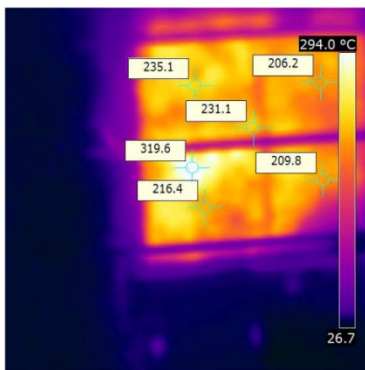


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:08:08	
Image Name	P20.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

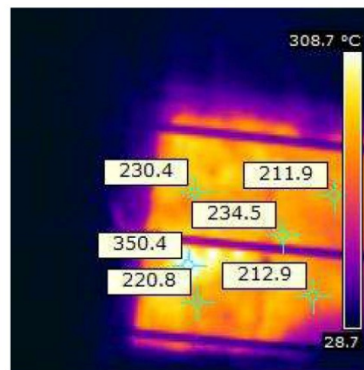
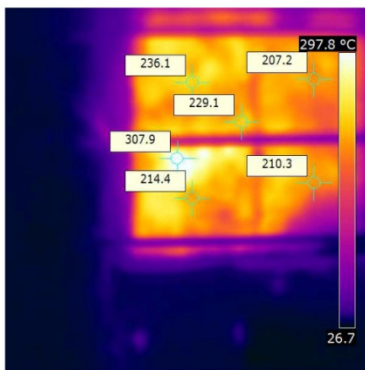


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:09:25	
Image Name	P22.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

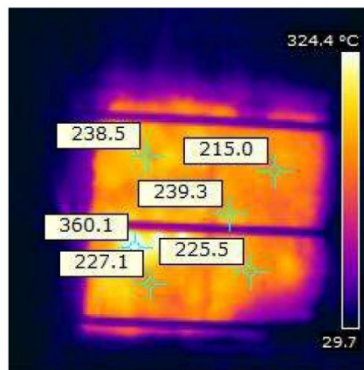
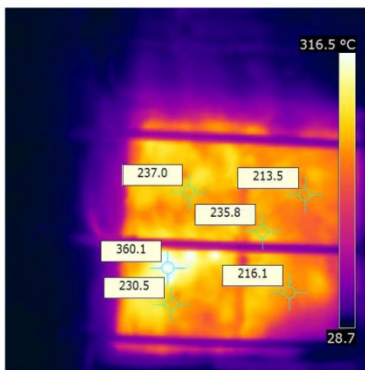


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:10:33	
Image Name	P24.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

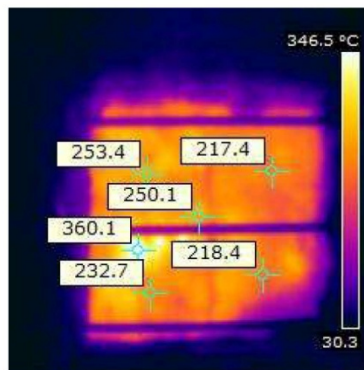
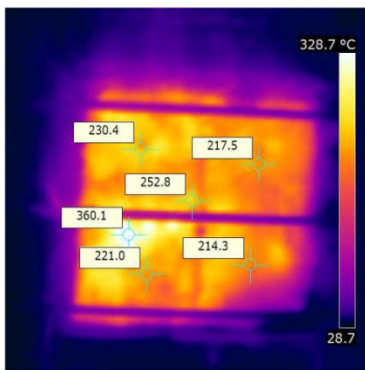


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:11:44	
Image Name	P26.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description





## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

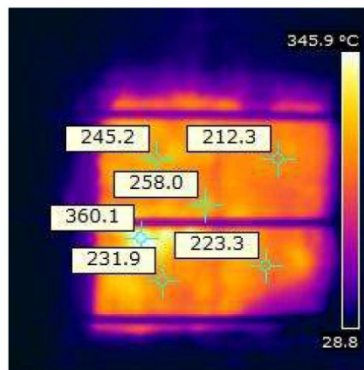
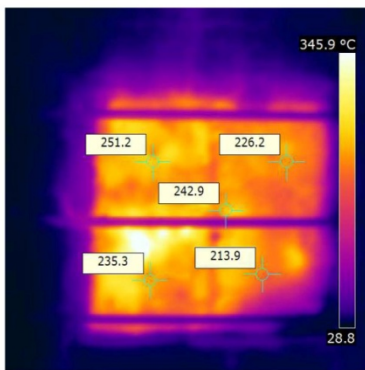


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:13:06	
Image Name	P28.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

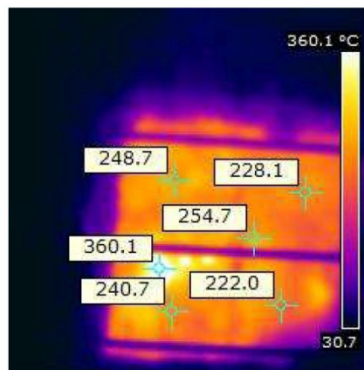
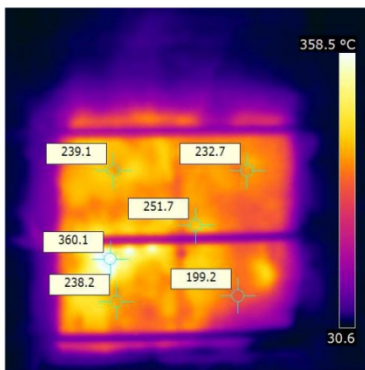


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:15:18	
Image Name	P30.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

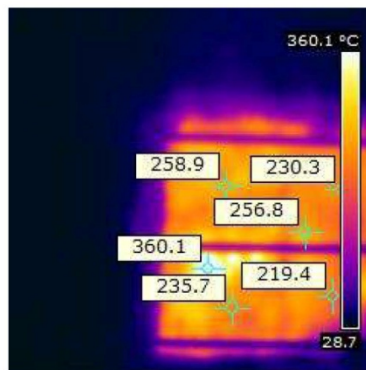
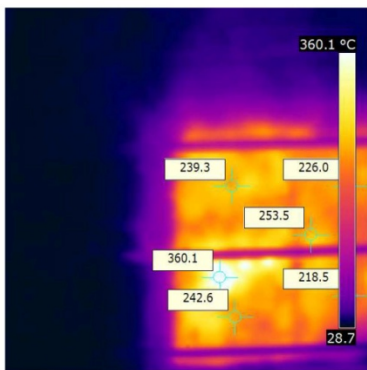


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:16:53	
Image Name	P32.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

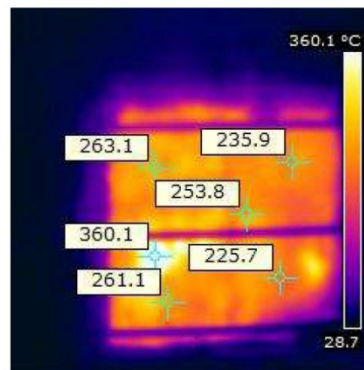
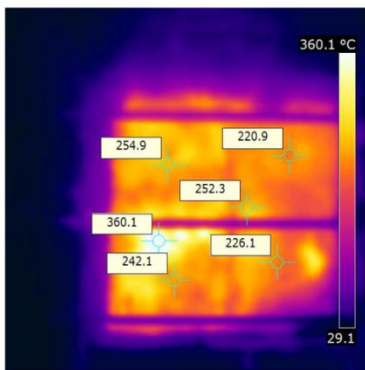


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:18:27	
Image Name	P34.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description



## Inspection Report

**Report Date** 04.08.2011  
**Company** UTCB  
**Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Thermographer**

**Customer** Valentin CUBLESAN  
**Site Address** Pache Protopopescu, nr. 66,  
 sector 2, Bucuresti  
**Contact Person**

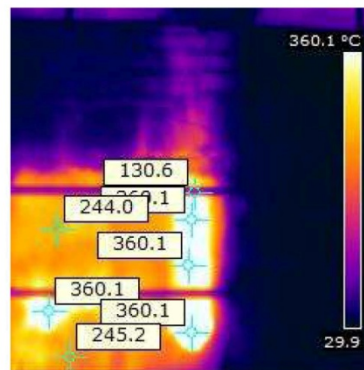
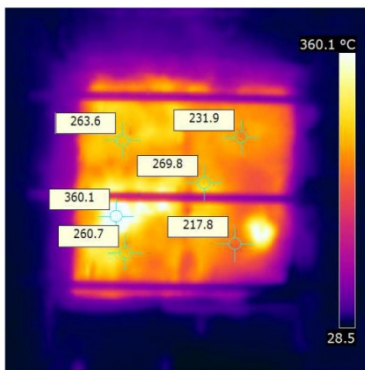


Image and Object Parameters		Text Comments
Camera Model	FLIR InfraCAM Wester	
Image Date	2011:08:04 13:19:49	
Image Name	P46.jpg	
Emissivity	0,93	
Reflected Temperature	20,0 °C	
Object Distance	2,0 m	

Description

Anexa 1. Buletinele de analiza a gazelor rezultate in urma procesului de ardere.

AFRISO EURO-INDEX SRL	MAXILYZER seria nr. 32	Măsurare curentă	COMBUSTIBIL gaz metan	Măsură completă	Oră: 9:33:13 Data: 2.08.11	O2 7.9 % CO 5 PPM CO2 7.4 % NO 35 PPM NOx 36 PPM T.gaze 22.5 °C T.aer 2.5 °C Dif.t. 99.9 % Randam. 99.9 % λ 0.1 % λa 1.41 CO 0% 10 PPM NO 0% 56 PPM NOx 0% 57 PPM	Tiraj --- hPa Punct C 48.6 °C Rand.C.105.9 % T.cazan: 0°C Furnizare --- Reziduu Comb. ---
AFRISO EURO-INDEX SRL	MAXILYZER seria nr. 32	Măsurare curentă	COMBUSTIBIL gaz metan	Măsură completă	Oră: 11:02:24 Data: 2.08.11	O2 11.4 % CO 3 PPM CO2 5.4 % NO 27 PPM NOx 27 PPM T.gaze 28 °C T.aer 24.9 °C Dif.t. 3.1 °C Randam. 99.8 % λ 0.2 % λa 2.20 CO 0% 9 PPM NO 0% 58 PPM NOx 0% 68 PPM	Tiraj --- hPa Punct C 42.5 °C Rand.C.104.2 % T.cazan: 0°C Furnizare --- Reziduu Comb. ---
AFRISO EURO-INDEX SRL	MAXILYZER seria nr. 32	Măsurare curentă	COMBUSTIBIL gaz metan	Măsură completă	Oră: 11:05:00 Data: 2.08.11	O2 7.6 % CO 0 PPM CO2 7.6 % NO 31 PPM NOx 32 PPM T.gaze 27 °C T.aer 24.9 °C Dif.t. 2.1 °C Randam. 99.9 % λ 0.1 % λa 1.57 CO 0% 0 PPM NO 0% 49 PPM NOx 0% 51 PPM	Tiraj --- hPa Punct C 49.1 °C Rand.C.106.1 % T.cazan: 0°C Furnizare --- Reziduu Comb. ---
AFRISO EURO-INDEX SRL	MAXILYZER seria nr. 32	Măsurare curentă	COMBUSTIBIL gaz metan	Măsură completă	Oră: 11:12:19 Data: 2.08.11	O2 6.7 % CO 0 PPM CO2 8.1 % NO 54 PPM NOx 56 PPM T.gaze 28 °C T.aer 25.2 °C Dif.t. 2.8 °C Randam. 99.8 % λ 0.2 % λa 1.47 CO 0% 0 PPM NO 0% 80 PPM NOx 0% 82 PPM	Tiraj --- hPa Punct C 50.4 °C Rand.C.106.5 % T.cazan: 0°C Furnizare --- Reziduu Comb. ---
AFRISO EURO-INDEX SRL	MAXILYZER seria nr. 32	Măsurare curentă	COMBUSTIBIL gaz metan	Măsură completă	Oră: 11:53:59 Data: 2.08.11	O2 6.6 % CO 0 PPM CO2 8.1 % NO 72 PPM NOx 74 PPM T.gaze 29 °C T.aer 25.6 °C Dif.t. 3.4 °C Randam. 99.8 % λ 0.2 % λa 1.46 CO 0% 0 PPM NO 0% 104 PPM NOx 0% 107 PPM	Tiraj --- hPa Punct C 50.5 °C Rand.C.106.5 % T.cazan: 0°C Furnizare --- Reziduu Comb. ---

Anexa 2. Proprietatile vatei minerale.

<b>ISOVER</b> Saint-Gobain Construction Products Romania S.R.L. Ploiesti, Mihai Bravu 233		<b>PLE 50</b> SR EN 13162:2009	
 Nr. Cert. 1840-DPC-99/91/EC/0114-07	 AEROQ	a = 1000 mm b = 600 mm c = 50 mm 	
<b>EUROCLASA A 1</b> $R_D = 1,25$ [m <sup>2</sup> K/W] $\lambda_D = 0,040$ [W/mK] COD: MW-EN 13162-T3-MU1		Buc./pachet 8	Suprafata acoperita: 4,8 m <sup>2</sup>
 5 945780 804521		17.07.2011	

$\epsilon_n$   
 (METALE)

Tabelul 25

Factorul energetic total de emisie  $\epsilon_n$  al metalelor

Metalul	Simbolul și compoziția %	Starea suprafeții	Temperatura		Factorul energetic total de emisie $\epsilon_n$ (1)
			t °C	T K	
Aur	Au	polizată fin	225	498,15	0,018
			625	898,15	0,035
		polizată	20	293,15	0,025
Alamă	Cu-Zn	nepolizată	20	293,15	0,47
		polizată	19	292,15	0,05
			300	573,15	0,032
		mată	56	329,15	0,202
			388	611,15	0,221
		brută, laminată	22	295,15	0,06
		laminată, polizată cu abraziv	22	295,15	0,20
		brumată	—	—	0,42
		oxidată	338	611,15	0,22
		oxidată la 600°C	200	473,15	0,61
	600	873,15	0,59		
		jeavă	—	—	0,208
Aliaj de nichel	Ni-Cr	oxidată la 600°C	200	473,15	0,41
			600	873,15	0,46
		18% Cr, 8% Ni cu oțel	215	488,15	0,44
			490	763,15	0,36
		18% Cr, 8% Ni cu oțel	225	498,15	0,62
			525	798,15	0,73
		Cr-Ni (18...32% Ni, 55...68% Cr, 20% Zn)	20	293,15	0,262
20 Ni, 25% Cr	215	488,15	0,90		
	525	798,15	0,97		
60% Ni, 12% Cr	270	543,15	0,89		
	560	833,15	0,82		
Aluminiu	Al	brună, cu asperități	25	298,15	0,070
		polizată	23	296,15	0,040
			225	498,15	0,039
			575	848,15	0,057
		laminată	170	443,15	0,039
		oxidată la 600°C	200	473,15	0,110
			600	873,15	0,190
		tablă de aluminiu pentru acoperiș	43	316,15	0,216
		Suprafața de cupru acoperită cu aluminiu prin încălzire la 600°C	200	473,15	0,180
			600	873,15	0,190
Suprafața de oțel acoperită cu aluminiu prin încălzire la 600°C	200	473,15	0,520		
	600	873,15	0,570		
Argint	Ag	polizată	20	293,15	0,025
		dreaptă, polizată	225	498,15	0,0198
			625	898,15	0,0342
		polizată	38	311,15	0,0221
	370	643,15	0,0312		
Bismut	Bi	decapată	80	353,15	0,340
Crom	Cr	polizată	150	423,15	0,058



Tabelul 23 (continuare)

Metalul	Simbolul și compoziția %	Starea suprafeții	Temperatura		Factorul energetic total de emisie $\epsilon_n$ (1)
			t °C	T K	
Crom-nichel	Cr-Ni		52	325,15	0,64
			1 035	1 308,15	0,75
Cupru	Cu	(cupru electrolitic) polizată foarte îngrjită	80	263,15	0,018
		polizată	20	293,15	0,030
			115	388,15	0,023
		ușor îngrjită	20	293,15	0,037
		zgfriată	20	293,15	0,070
		oxidată	130	403,15	0,760
		oxidată prin încălzire la 600°C	200	473,15	0,570
			600	873,15	0,550
		brumată	20	293,15	0,780
		laminată			0,040
				topită	1 075
			1 275	1 548,15	0,130
		leavă			0,360
Cositor	Sn	lucioasă	20	293,15	0,070
		albă	24	297,15	0,056...0,086
Fier	Fe	(electrolitic) polizată fin	175	448,15	0,052
			225	498,15	0,064
		polizată	425	698,15	0,144
			1 020	1 293,15	0,377
		polizată cu praf de șlefuit fin	20	293,15	0,242
		decapată cu acid	150	423,15	0,128
		curată	20	293,15	0,24
		ruginită, roșie	20	293,15	0,61
		ruginită în profunzime	20	293,15	0,85
		oxidată, netedă	125	398,15	0,78
			525	798,15	0,82
		topită, oxidată mat	20	293,15	0,94
			360	633,15	0,94
	20	293,15	0,77		
		cu crustă de la laminare			
Fier	Fe	tablă lucioasă	900	1 173,15	0,55
			1 040	1 313,15	0,60
		fontă, brută	925	1 198,15	0,87
			1 115	1 388,15	0,95
		(refractor) oxidată	80	353,15	0,613
	500	773,15	0,45		
	200	473,15	0,21		
Fontă cenușie		polizată	22	295,15	0,435
		prelucrată prin așchiere	830	1 103,15	0,600
			990	1 263,15	0,700
		oxidată la 600°C	200	473,15	0,64
			600	873,15	0,78
		ruogoasă, puternic oxidată	40	313,15	0,95
			250	523,15	0,95
		suprafață plană brută, obținută prin turnare	100	373,15	0,80
topită	1 330	1 603,15	0,28		

$\epsilon_n$   
 (METALE) Tabelul 23 (continuare)

Metalul	Simbolul și compoziția %	Starea suprafeții	Temperatura		Factorul energetic de emisie $\epsilon_n$ *)		
			t °C	T K			
Manganin	—	laminată, lucioasă	118	391,15	0,048		
Mercur	Hg		0 100	273,15 373,15	0,09 0,12		
Metal alb antifricțiune	—	prelucrată, lucioasă	—	—	0,056 0,086		
Molibden	Mo	filament de	725 2 600	998,15 2 873,15	0,096 0,292		
Nichel	Ni	polizată	100 230 375	373,15 503,15 648,15	0,045 0,070 0,087		
		oxidată	100	373,15	0,41		
		oxidată la 600°C	200 600	473,15 873,15	0,37 0,48		
		tablă de fier nichelat, polizată	24	297,15	0,056		
		mată	20	293,15	0,111		
		(fier polizat nichelat) polizată	23	296,15	0,045		
		(fier decapat nichelat) nepolizată	20	293,15	0,110		
		fier de nichel	185 1 000	458,15 1 273,15	0,096 0,186		
		Oțel		tablă polizată	940 1 100	1 213,15 1 373,15	0,580 0,610
				tablă laminată	20	293,15	0,057
tablă cu un strat aderent și lucios de oxid	25			298,15	0,82		
Tablă cu un strat rugos și gros de oxid	25			298,15	0,80		
oxidată la 600°C	200 600			473,15 873,15	0,79 0,79		
oxidată, rugoasă	40 370			313,15 643,15	0,94 0,97		
plastică, topită	1 600 1 800			1 873,15 2 073,15	0,28 0,28		
țevă de	0 200			273,15 473,15	0,745 0,800		
(tablă) oxidată	—			—	0,870		
polizată	770 1 040			1 043,15 1 313,15	0,52 0,56		
tablă galvanizată	—			—	0,262		
— cu crom	800 1 100			1 073,15 1 373,15	0,660 0,540		
— turnat	650 1 255			923,15 1 528,15	0,59 0,86		
— pentru scule	225 625	498,15 898,15	0,054 0,104				
Oxid de cupru		polizată	925 1 115	1 198,15 1 388,15	0,12 0,17		
		bandă de platină	25 1 230	298,15 1 503,15	0,036 0,192		
		Filament de platină	225 1 375	498,15 1 648,15	0,073 0,182		
		fir de platină	225 1 375	498,15 1 648,15	0,073 0,182		

$\epsilon_n$   
(METALE)  
Tabelul 23 (continuare)

Metalul	Simbolul și compoziția %	Starea suprafeții	Temperatura		Factorul energetic total de emisie $\epsilon_n$ <sup>1)</sup>
			t °C	T K	
Plumb	Pb	polizată	130	403,15	0,056
			230	503,15	0,074
		oxidată, cenușie	20	293,15	0,28
		oxidată la 200°C	200	473,15	0,63
Siliniu turnat		polizată	150	423,15	0,186
Tantal	Ta	filament	1 325	1 598,15	0,193
			2 525	2 798,15	0,310
Tungsten	W		230	503,15	0,053
			2 230	2 503,15	0,310
		Filament	3 300	3 573,15	0,39
		Filament, uzată	25	298,15	0,032
			3 300	3 573,15	0,035
Zinc	Zn	polizată	230	503,15	0,045
			325	598,15	0,053
		mată	20	293,15	0,25
			50	323,15	0,21
			280	553,15	0,21
		oxidată prin încălzire la 400°C	400	673,15	0,11
		(tablă de fier galvanizat) lucioasă	28	301,15	0,228
(fier galvanizat) oxidată cenușie	24	297,15	0,276		

<sup>1)</sup>  $\epsilon_n$  este factorul total energetic de emisie după normala la suprafață. Pentru factorul total energetic de emisie emisiv  $\epsilon$ , se poate admite medierea:  $\epsilon = 1,2 \cdot \epsilon_n$  pentru suprafețele metalice lucioase;  $\epsilon = 0,95 \cdot \epsilon_n$  pentru toate corpurile cu suprafață dreaptă (plană);  $\epsilon = 0,98 \cdot \epsilon_n$  pentru suprafețele rugoase.

$\epsilon_n$   
(CORPURI NEMETALICE)

Tabelul 24

Factorul energetic total de emisie  $\epsilon_n$  al corpurilor nemetalice

Corpul	Starea suprafeții	Temperatura		Factorul energetic total de emisie $\epsilon_n$
		t °C	T K	
Azbest, carton		24	297,15	0,96
— hirtie		40	313,15	0,93
		370	643,15	0,95
— plăci		20	293,15	0,96
		60	333,15	0,665
Ardezie	polizată la piatră	200	473,15	0,665
		70	343,15	0,91
Argilă		1 200	1 473,15	0,60
Argilă refractară usă (șmotă)				0,78
Bumbac		20	293,15	0,93
Căramidă	roșie, rugoasă	20	293,15	0,93
		1 100	1 373,15	0,85
Căramidă dură	rugoasă, sticloasă	1 000	1 273,15	0,80
				0,86
Cărmidă dură	rugoasă, nesticloasă	24	297,15	0,86
		20	293,15	0,93
Cauciuc moale	cenușie	20	293,15	0,93
Carton asfaltat pentru acoperiș		20	293,15	0,93
Cărbune, pur	polizată la piatră	125	398,15	0,81
		625	898,15	0,79
Corindon, praf aplicat pe hirtie (șmirghel)	rugoasă	80	353,15	0,855
Cuarț	topită, rugoasă	20	293,15	0,93
		24	297,15	0,95
Ebonită	neagră, rugoasă	24	297,15	0,95
Email alb	lucioasă (sticloasă) pe fier, coaptă	20	293,15	0,90
		0	273,15	0,945
Funingine (negru de fum)		370	643,15	0,945
		1 040	1 313,15	0,53
Filament de cărbune		1 405	1 678,15	0,53
		0	273,15	0,966
Ghiață	lucioasă, apă rugoasă	0	273,15	0,985
				0,427
Granit	polizată la piatră	—	—	0,427
Gresie	polizată la piatră, lisă	—	—	0,576
				0,90
Gips		0	273,15	0,90
		200	473,15	0,90
Hirtie		20	293,15	0,80
		95	368,15	0,92

(CORPURI NEMETALICE)  
Tabelul 24 (continuare)

Corpul	Starea suprafeții	Temperatura		Factorul energetic de emisie $\epsilon_n$ <sup>1)</sup>
		t °C	T K	
Lemn:	rindelată	20	293,15	0,900
		70	343,15	0,925
— de fag	rindelată	70	343,15	0,935
— de stejar	rindelată	21	294,15	0,885
Linoleum	—	20	293,15	0,885
Marmură	—	22	295,15	0,93
	—	—	—	0,545
Materiale refractare	—	500	773,15	0,80
		600	873,15	0,85
		1 000	1 273,15	0,90
—	—	500	773,15	0,65
		600	873,15	0,70
		1 000	1 273,15	0,75
Porțelan	—	20	293,15	0,93
		—	—	—
Piatră de argilă refractară (de șamot)	—	1 000	1 273,15	0,75
		1 220	1 493,15	0,60
Piatră de magnezie	—	1 390	1 663,15	0,39
Piatră silicoasă	—	1 000	1 273,15	0,80
		1 220	1 493,15	0,66
Piatră de silimanită	—	1 390	1 663,15	0,29
Postav de lână	—	20	293,15	0,75
Sticlă	—	20	293,15	0,90
		90	363,15	0,94
Țesătură de mătase	—	20	293,15	0,77
Tencuială de var	—	20	293,15	0,93
		200	473,15	0,93
Zidărie	—	0	273,15	0,93
		200	473,15	0,93

<sup>1)</sup>  $\epsilon_n$  este factorul total energetic de emisie după normala la suprafață. Pentru factorul total energetic de emisie semi-sferic  $\epsilon$ , se poate admite medierea:  $\epsilon = 1,2 \cdot \epsilon_n$  pentru suprafețele metalice lucitoare;  $\epsilon = 0,95 \cdot \epsilon_n$  pentru toate corpurile cu suprafață dreaptă (plană);  $\epsilon = 0,98 \cdot \epsilon_n$  pentru suprafețele rugoase.

Piatră silicoasă  $\left\{ \begin{array}{l} \epsilon = 0,80 \\ t = 1000^\circ\text{C} \end{array} \right.$