

ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII ȘI
TINERETULUI
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
FACULTATEA DE MECANICĂ



URL: www.mec.tuiasi.ro * E-mail: decanat@mail.tuiasi.ro
Tel./fax. +40 232 232337 * B-dul Dimitrie Mangeron, nr.61, 700050,
Iași

CERCETĂRI ASUPRA SISTEMELOR DE POSTCOMBUSTIE ÎN TURBOMOTOARE UTILIZÂND COMBUSTIBILI GAZOȘI

- TEZĂ DE DOCTORAT - -REZUMAT-

Conducător de doctorat:
prof. univ. **Prof.Dr.Ing. Gheorghe Dumitrascu**

Doctorand: Ing. Florean Florin Gabriel

Nr. Decizie Senat 2043 din 24.09.2013

- IAȘI, 2013-

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI
RECTORATUL

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de 18.11.2013 la ora 10.00 în sala M3 a Facultății de Mecanică , va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

**"CERCETĂRI ASUPRA SISTEMELOR DE POSTCOMBUSTIE ÎN
TURBOMOTOARE UTILIZÂND COMBUSTIBILI GAZOȘI"**

elaborată de domnul **FLOREAN FLORIN GABRIEL** în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

- | | |
|--|------------------------|
| 1. Prof.Dr.Ing Cezar Opreșan, Decan Fac.Mecanică,U.T"Gheorghe Asachi" Iași | președinte |
| 2. Prof.Dr.Ing. Gheorghe Dumitrașcu, U.T"Gheorghe Asachi" Iași | conducător de doctorat |
| 3. Dr.Ing C.S.I. Valentin Silvestru, INCDT COMOTI București | referent oficial |
| 4. Prof.Dr.Ing Sterian Dănăila, Univ. Politehnica București | referent oficial |
| 5. Prof.Dr.Ing Tudor Prisecaru, Univ. Politehnica București | referent oficial |

Vă trimitem rezumatul tezei de doctorat cu rugămintea de a ne comunica, în scris, aprecierile dumneavoastră.

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.


RECTOR,
Prof.univ.dr.Ing **ION GIURMĂ**

Secretar universitate,

Ing.Cristina Nagiț

Cuprins

Obiectivele cercetării doctorale	4
CAPITOLUL 1 Introducere.....	5
1.1. Motivația cercetării.....	5
1.2. Motivația dezvoltării unei aplicații concrete a cercetării doctorale.....	6
1.3. Analiza stadiului de dezvoltare a cercetărilor în domeniu	8
CAPITOLUL 2 Modelarea sistemelor de postcombustie cu combustibili gazoși.....	9
2.1. Ecuațiile care guvernează curgerea reactivă printr-un sistem de postcombustie	9
2.2. Modelarea curgerii turbulente reactive	9
2.3. Interacțiunea dintre combustie și turbulență.....	10
2.4. Descrierea algoritmului numeric unidimensional folosit.....	11
2.5. Descrierea algoritmului numeric tridimensional folosit	15
CAPITOLUL 3 Cercetări experimentale.	16
3.1. Amenajarea experimentală	16
3.2. Măsurători laser PIV experimentale în jetul liber al turbomotorului, fără montarea modelului de postcombustie realizat.....	20
3.3. Măsurători laser PIV experimentale pe modelul de postcombustie realizat, fără aprindere.....	22
3.4. Măsurători laser PIV experimentale pe modelul de postcombustie realizat, cu aprindere.....	23
CAPITOLUL 4 Rezultatele simulării numerice unidimensionale.....	29
4.1. Rezultate simulării numerice unidimensionale ale jetului liber al turbomotorului, fără montarea modelului de postcombustie realizat.....	29
4.2. Simularea numerică a flăcării într-un jetul circular turbulent, validată de măsurători experimentale din literatură	30
CAPITOLUL 5 Analiza comparativă a rezultatelor numerice tridimensionale și a măsurătorilor experimentale.....	33
5.1. Rezultate ale simulării numerice tridimensionale a sistemului de postcombustie pentru curgerea nereactivă.....	33
5.2. Rezultate ale simulării numerice tridimensionale a sistemului de postcombustie pentru curgerea reactivă	36
CAPITOLUL 6 Concluzii	39
CAPITOLUL 7 Contribuții originale personale	40
CAPITOLUL 8 Direcții de dezvoltare viitoare	42
CAPITOLUL 9 Bibliografie.....	43

Obiectivele cercetării doctorale

În cercetarea doctorală obiectivul principal a constat *în proiectarea și realizarea practică a unui model experimental de sistem de postcombustie optimizat, prin corelarea rezultatelor experimentale cu rezultatele obținute prin simulare numerică.*

Obiectivele specifice fazelor cercetării au fost:

1. Definirea metodicii experimentale prin alegerea instrumentației și a metodicii de etapizare a experimentelor.
2. Realizarea de măsurători experimentale de mare precizie și tehnicitate (Laser PIV) ale câmpurilor de viteze instantanee în jetul liber al generatorului de gaz pe care va fi instalat sistemul de postcombustie optimizat, în vederea determinării cât mai precise a condițiilor de funcționare a acestuia;
3. Realizarea de măsurători experimentale de mare precizie și tehnicitate (Laser PIV) ale câmpurilor de viteze instantanee pe modelul experimental de sistem de postcombustie fără aprinderea flăcării în acesta, în vederea analizei detaliate a dinamicii curgerii în absența reacției chimice, și a modului în care aceasta este în măsură să afecteze performanțele sistemului de postcombustie;
4. Realizarea de măsurători experimentale de mare precizie și tehnicitate (Laser PIV, LIF și Rayleigh) ale câmpurilor de viteze instantanee, temperaturi medii, și ale poziției și stabilității frontului de flacără pe modelul experimental de sistem de postcombustie în funcționare;
5. Realizarea de simulări numerice unidimensionale utilizând modele de combustie și amestecare de înaltă acuratețe, ale jeturilor turbulente izoterme și reactive, folosind și adaptând codul de calcul existent în laborator;
6. Realizarea de simulări numerice tridimensionale ale curgerii turbulente fără aport de căldură (fără aprinderea postcombustiei) în modelul experimental de sistem de postcombustie optimizat, proiectat și realizat anterior.
7. Realizarea de simulări numerice tridimensionale ale curgerii turbulente cu aport de căldură (cu aprinderea postcombustiei) în modelul experimental de sistem de postcombustie optimizat, proiectat și realizat anterior folosind codul ANSYS CFX, existent în COMOTI;

8. Validarea rezultatelor simulărilor numerice cu datele experimentale obținute în cadrul studiilor prezentate în această lucrare, precum și cu date experimentale existente în literatura de specialitate.

CAPITOLUL 1 Introducere

1.1. Motivația cercetării

Până în prezent, cea mai importantă sursă de energie utilizabilă în scopuri industriale disponibilă este energia chimică stocată în hidrocarburile fosile (petrol, cărbune, etc.) și în derivatele acestora (benzină, motorină, etc.). De aceea, procesul de combustie, prin care acești combustibili sunt arși și energia chimică stocată este eliberată, este de o importanță crucială pentru orice proces ingineresc, și în special pentru aplicațiile din energetică.

Analiza în profunzime a fenomenelor caracteristice proceselor și mecanismelor prin care speciile chimice care formează combustibilul reacționează și sunt transformate exoterm în produși de reacție, a mecanicii curgerii gazelor prin camera de ardere în care se desfășoară aceste procese, precum și a interacțiunii dintre curgerea turbulentă și ardere, devine, astfel, esențială pentru dezvoltarea pe mai departe a acestui domeniu de cercetare.

Această teză se va concentra asupra combustiei preamestecate, iar combustibilul utilizat este gazul metan.

Motivația efortului de cercetare depus în cadrul acestei teze este strâns legată de obiectivele de cercetare ale Institutului Național de Cercetare – Dezvoltare Turbomotoare COMOTI, unde autorul își desfășoară activitatea profesională.

Cercetările autorului reflectate în această lucrare sunt motivate de acest obiectiv, fiind focalizate asupra dezvoltării unui sistem de postcombustie utilizând combustibili gazeși menit să echipeze turbomotoarele stațiilor de cogenerare dezvoltate de INCD Turbomotoare COMOTI. Aceste cercetări au pornit de la preocupările Laboratorului de Combustie și Laserometrie al INCD Turbomotoare COMOTI [124], prin care s-a relevat depresiunea creată de stabilizatoarele de flacără de tip „V”, și au condus la cercetări asupra fenomenelor de aprindere, ejecție și stabilizare, folosind această caracteristică. În prezenta teză, autorul și-a propus și a realizat studii teoretice, numerice și experimentale în vederea proiectării și optimizării aerodinamice și termogazodinamice a procesului de ardere, a sistemului de postcombustie, efortul de cercetare concentrându-se asupra flăcării stabilizate prin intermediul plasării unui corp neaerodinamic de tip „V”, în curgere.

1.2. Motivația dezvoltării unei aplicații concrete a cercetării doctorale

Cercetarea doctorală a fundamentat elaborarea unui brevet OSIM cu numele: “Instalație de postcombustie, multietajată, în skid turbomotor autoventilat”, [4], unde autorul este prim autor.

Brevetul consideră o instalație de cogenerare unde, prin folosirea vitezei la ieșirea din turbomotor ca ejecție pentru aerul de răcire a skid-ului și prin folosirea depresiunii create de stabilizatoarele de flacără de tip „V” a sistemului multietajat cu diluție mare, să se obțină reducerea factorilor poluanți și mărirea stabilității flăcării.

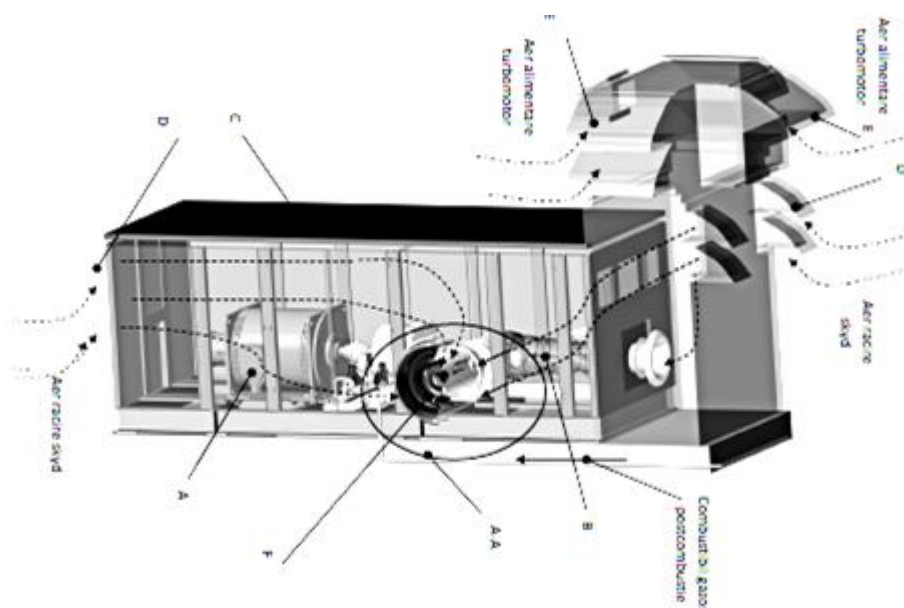


Fig. 1.1 Ansamblul instalației

Astfel, în Fig. 1.1 este prezentat ansamblul instalației, în Fig. 1.2 este prezentată vederea 3D parțial secționată, iar în Fig.1.3 este prezentat sistemul primar de stabilizare prin corp neaerodinamic de tip”V”, folosit inclusiv pentru aprinderea cu auto-aspirație a flăcării.

Instalația este deosebit de complexă necesitând cercetări intense de realizare și optimizare. În această teză autorul a studiat „Treapta I de stabilizare a flăcării” (Fig. 1.4).

Lucrările prezentate în aceasta teză, în special cele experimentale, au fost derulate pe contractul PN II (Planul National de Cercetare, Dezvoltare și Inovare), o parte din concluzii fiind prezentate în cadrul acestui contract, și la diferite conferințe (AIIA, ASME, COST - CM0901 - Detailed chemical kinetic models for cleaner combustion [125]). De asemenea, au fost folosite cunoștințele acumulate de autor în cadrul specializărilor efectuate în domeniul laserometriei și al cineticii arderii la Paul Scherrer Institute (PSI), Villingen, Elvetia și la

Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Karlsruhe, Germania în cadrul programului COST-CM0901.



Fig. 1.4 - Vedere ansamblu general postcombustie

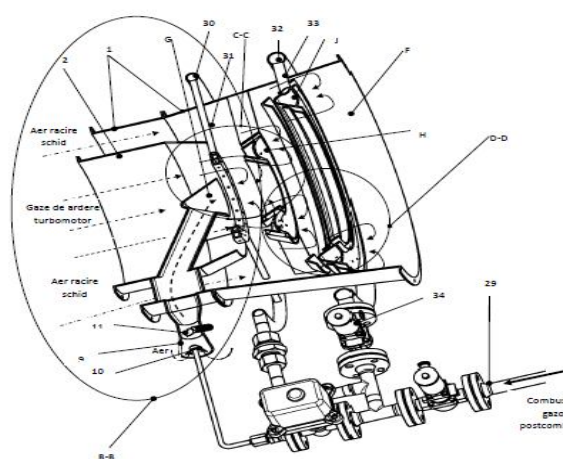


Fig. 1.2 Vederea 3D parțial secționată

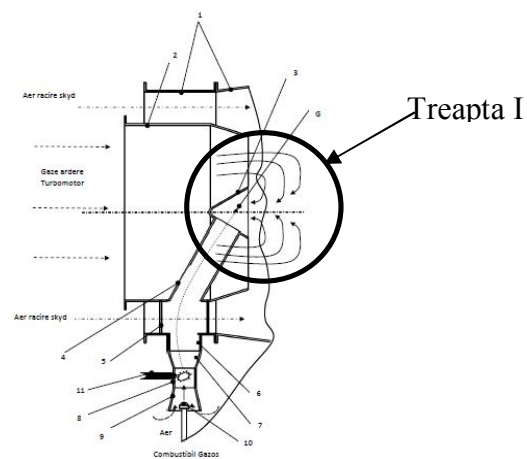


Fig. 1.3 Detaliu din Fig.1.2 cu sistemul primar de stabilizare prin corp neaerodinamic de tip "V"

În urma acestor studii a rezultat valabilitatea metodelor experimentale și de calcul adoptate, rezultând ca, în dezvoltarea unui sistem de postcombustie să se poată folosi codurile amintite mai sus, cu metoda de calcul folosită, reducându-se astfel costurile experimentale uzuale, fiind necesare doar experimente finale, pe sisteme optimizate prin calcul, cu eventuale mici ajustări.

1.3 Analiza stadiului de dezvoltare a cercetărilor în domeniu

Sistemul de postcombustie este o componentă care se adaugă unor motoare de aviație (turbomotoare), de obicei celor militare, cu scopul de a maximiza forța de tracțiune a avioanelor.

În timpul când amestecul format din aer, combustibil și gazul rezultat după procesul primar de combustie intră în regiunea stabilizatorului de flacără, cele trei componente sunt bine amestecate, aproape la nivel molecular, astfel încât arderea poate avea loc. După ce amestecul trece în avalul vârfului stabilizatorului de flacără în forma de „V”, antrenează produși de reacție complet arși și fierbinți din zona de recirculare într-un strat de amestecare creat și menținut de eforturile de forfecare. Într-un punct suficient de departe în aval se va stabili un front de flacără staționar. Imediat în avalul acestui front de flacără staționar, zone de fluid conținând gaze în curs de ardere se desprind din stratul de amestecare creat și sunt purtate prin convecție către aval. Aceste gaze desprinse își schimbă direcția și curg către amonte în interiorul bulei formate de zona de recirculare, unde timpul de rezidență este suficient de mare ca să permită arderea lor aproape completă. Restul gazelor aflate în curs de ardere, dinspre exterior pe direcție radială, și aflate în spatele flăcării staționare, propagă un front de flacără turbulentă radial către exterior, prin fluxul de gaz care ocolește stabilizatorul de flacără. O trecere în revistă a acestor eforturi de cercetare de la mijlocul secolului XX poate fi găsită în referințele [22, 23].

Primele studii fundamentale ale mecanismului de stabilizare a flăcării în avalul corpurilor neaerodinamice au fost efectuate de către Williams și Shipman [24]. De asemenea, mecanismul de stabilizare a flăcării a fost studiat de Zukoski și Marble [25, 26] analizând geometria din aval a curgerii prin studierea a diferite viteze ale curgerii fluidului de lucru, astfel încât a descoperit că lungimea zonei de recirculare a crescut pe măsură ce viteza este mai mare. Longwell și colaboratorii [27] și mai târziu, Westenberg și colaboratorii [28] au măsurat o gamă de rapoarte de echivalență în cazul unei flăcări preamestecate stabilizate de un corp neaerodinamic.

În ultimul deceniu au fost raportate și studii numerice detaliate, utilizând tehnica LES și modele avansate de combustie, ale flăcărilor preamestecate și parțial preamestecate stabilizate de corpi neaerodinamice [46].

CAPITOLUL 2 Modelarea sistemelor de postcombustie cu combustibili gazoși

2.1. Ecuațiile care guvernează curgerea reactivă printr-un sistem de postcombustie

Simularea a considerat o curgere reactivă după procesul de combustie propriu zisă. Principalele ecuații care descriu curgerea fluidelor se bazează pe patru legi universale fundamentale de conservare. Formularea metodicii principiilor generale este reprezentată de binecunoscutele ecuații Navier – Stokes.

2.2 Modelarea curgerii turbulente reactive

Curgerile turbulente sunt fenomene foarte răspândite atât în procesele naturale din lumea înconjurătoare (precum curgerea unui râu, sau vântul) cât și în aplicații tehnice și industriale (evacuarea fumului și a gazelor de ardere dintr-un coș, curgerea aerului printr-o pompă sau compresor).

În cazul curgerilor turbulente, forțele inerțiale depășesc în magnitudine forțele vâscoase, astfel încât instabilitățile care iau naștere în curgere au tendința de a crește și de a forma rapid structuri rotative mari (vârtejuri) și cu un conținut energetic ridicat, caracterizate de diverse scări de lungime. Deși scara de lungime ce caracterizează curgerea este de obicei suficient de mare pentru ca domeniul de calcul să poată fi discretizat prin rețele de calcul rezonabil de dense, scară de lungime a lui Kolmogorov, η , este cu mult mai mică. Cum într-o curgere turbulentă aceasta din urmă reprezintă scara la care există cele mai mici vârtejuri turbulente, integrarea numerică trebuie realizată până la această scară pentru a captura cu acuratețe mișcarea fluidă și gradientii mărimilor fizice implicate. O soluție a problemei resurselor de calcul ridicate de curgerile turbulente o constituie așa numita tehnică de „Mediere Reynolds a ecuațiilor Navier – Stokes” (RANS).

Procesul de „filtrare” prin care se obțin valorile mediate generează o serie de termeni suplimentari, care intră în ecuațiile RANS ca necunoscute [52]. Acești termeni poartă, în general, numele de „eforturi Reynolds” și necesită a fi modelați pentru a permite rezolvarea numerică a sistemului de ecuații.

După efectuarea unei serii de teste folosind diferite modele de turbulență dintre opțiunile existente în Ansys CFX, prin corelarea rezultatelor numerice cu cele experimentale s-a observat că cele mai bune rezultate pentru cazul prezent le furnizează modelul RNG $k - \epsilon$.

2.3 Interacțiunea dintre combustie și turbulență

Combustia este un proces bazat pe o reacție chimică oxidantă auto-propagată exotermică. Frontul de flacără se poate propaga în două moduri: prin deflagrație sau detonație. Deflagrația este similară unei explozii relativ lente, produsă de reacțiile chimice, care generează numai unde de presiune subsonice. Aceasta explozie are ca efect scăderea de presiune și densitate. Contrar, detonația este practic explozivă și se manifestă prin apariția undelor de șoc cu viteze de propagare supersonice. ***În această teză m-am concentra doar pe cercetarea frontului de flacără ce se propagă prin deflagrație.***

O înțelegere completă a procesului de combustie care are loc într-o cameră de ardere necesită înțelegerea detaliată a interacțiunii și interdependenței dintre combustie și turbulență, iar domeniul de cercetare al combustiei turbulente rămâne încă deschis și este privit de cercetători prestigioși în domeniu ca „cea mai importantă problemă nerezolvată în fizica clasică” [58].

O altă problemă teoretică apărută în cazul combustiei turbulente este constituită de interdependența diverselor scale de lungime și timp implicate în problemă. Pe lângă marea varietate de scale implicate în procesul de turbulență, combustia are loc la nivel molecular și implică o mulțime de reacții chimice elementare, fiecare dintre acestea având scările sale de lungime și temporale caracteristice și dacă se consideră simultan întreaga această plajă de scale implicate, problema devine mult mai complexă și mai costisitoare din punctul de vedere al simulării numerice.

Pentru o simplificare a problemei care s-o facă rezolvabilă numeric în limite rezonabile de timp de calcul, este nevoie de o ipoteză simplificatoare. O astfel de ipoteză este constituită de așa-numita ipoteza de separare a scalelor [58]. Această ipoteză presupune că în subzona inerțială a turbulenței scalele caracteristice procesului de combustie sunt separate de scalele turbulente. Cu toate că ipoteza introduce o simplificare majoră a problemei combustiei turbulente și că este utilizată ca atare într-o mulțime de modele de combustie existente în literatură, ipoteza nu este validă în regimul zonei de reacție întrerupte, în care cele mai mici vârtejuri turbulente sunt mai mici decât grosimea stratului interior al flăcării și procesele chimice din acesta sunt puternic afectate de turbulență.

Modelul de combustie ales în simulările unidimensionale efectuate de autor este Modelul amestecului prin vârtej liniar (LEM), care își păstrează validate în toate regimurile de combustie, fiind considerat cel mai performant model existent în literatură.

Modelul de combustie ales în simulările tridimensionale efectuate de autor este Modelul EDM extins, din cauza limitărilor resurselor de calcul disponibile.

2.4 Descrierea algoritmului numeric unidimensional folosit

Algoritmul unidimensional care va fi descris în continuare are ca domeniu de validitate a ipotezelor simplificatoare pe care le utilizează jeturile turbulente rotunde, reactive sau nu, așa cum este jetul de evacuare dintr-un turbomotor în absența unui sistem de postcombustie instalat.

Utilitatea acestui algoritm este că, deși necesită un timp de calcul extrem de redus în comparație cu simulările numerice tridimensionale, este capabil, datorită unei abordări semi-empirice care combină rezultate experimentale clasice cu o modelare de înaltă calitate a fizicii scalelor turbulente mici, bazată pe o înțelegere a fenomenelor care guvernează curgerea turbulentă, să producă rezultate de acuratețe remarcabilă, așa cum o arată o serie de studii numerice și experimentale, [96, 97].

Astfel, utilizarea algoritmului prezentat aici este capabilă de a furniza date corecte pentru inițializarea, în secțiunea de ieșire din turbomotor și de intrare în sistemul de postcombustie, a simulărilor numerice mai complexe ce au fost realizate de autor și vor fi prezentate în secțiunile următoare.

Fizica curgerii fluidului într-un jet turbulent este descrisă de ecuațiile de difuzie ale speciilor chimice și ale temperaturii sub ipoteza numărului Lewis unitar [98].

$$\rho \frac{\partial Y_k}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla Y_k - \nabla \cdot (\rho D_k \cdot \nabla Y_k) - \dot{\omega}_k = 0 \quad (2.72)$$

$$\rho \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \vec{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\rho D_T \cdot \nabla T) - \dot{\omega}_T = 0 \quad (2.73)$$

Ecuațiile (2.72 și 2.73) asociază cantități instantanee și pentru a putea fi rezolvate numeric, ecuațiile necesită discretizare. Dacă este folosită o rețea de discretizare de mărime obișnuită, este necesar un proces de filtrare și, mai mult, apar termeni de corelație, termeni care necesită modelarea mărimilor fizice necunoscute rezultate din filtrarea LES.

Abordarea tratează explicit cinci procese fizice care descriu curgerea jetului reactiv turbulent: antrenarea fluidului ce înconjoară jetul turbulent de către scări turbulente mari,

amestecarea jetului la scări turbulente mici, difuzia moleculară la scări mici și reacția chimică. Rețeaua de discretizare în acest caz trebuie să fie destul de fină astfel încât să poată capta cele mai mici scări turbulente (scările Kolmogorov[52]) pentru ca ecuațiile de difuzie să poată fi rezolvate numeric, fără a fi necesară modelarea, pe un domeniu unidimensional, poziționat, în acest studiu, radial, și transportat prin convecție către aval la o viteză prescrisă, respectând conservarea masei și impulsului. Impactul vârtejurilor turbulente din zona inerțială asupra câmpurilor scalare este modelat prin tehnica LEM, folosind un proces de calcul numit inversarea celulelor ("block-inversion") [101]. Dimensiunea, poziția și frecvența acestor evenimente sunt determinate folosind legi de scalare ale zonei inerțiale, valide pentru turbulența tridimensională.

Algoritmul numeric va fi descris pe scurt mai jos [100]. Simularea modelului include cinci procese majore:

- I. Convecția axială la scară mare a domeniului unidimensional radial
- II. Advecția la scară mare în direcție radială
- III. Difuzia moleculară în domeniul unidimensional
- IV. Amestecul turbulent în domeniul unidimensional
- V. Reacția chimică

I. Convecția axială la scară mare a domeniului unidimensional radial

Împrăștierea jetului este modelată folosind legea similarității jetului pentru jetul rotund [102]

$$\frac{U_0}{u} = c \frac{x - x_0}{d_0} \quad (2.74)$$

$$x_0 = -\frac{d_0}{c} \quad (2.75)$$

Viteza axială, determinată de ecuația (2.74), este considerată constantă de-a lungul domeniului radial, astfel încât liniile radiale sunt transportate prin convecție la aceeași viteză, rămânând o linie dreaptă pe toată durata calculului.

Poziția axială a domeniului linear și timpul curent al integrării numerice, t , sunt legate prin relația:

$$u = \frac{x - x_0}{t} \quad (2.76)$$

Împrăștierea jetului turbulent este descris în model prin mărirea diametrului jetului, d :

$$d = c(x - x_0) \quad (2.77)$$

Este important de observat că, în ecuația (2.75), constanta c controlează scăderea vitezei axiale medii, iar în ecuația (2.77), aceeași constantă c controlează împrăștierea jetului rotund [52]

II. Advecția la scară mare în direcție radială

Pe măsură ce evoluează în aval, jetul turbulent se împrăștie radial, ca efect al conservării masei, deoarece viteza este independentă de poziția radială și scade către aval.

Advecția la scară mare în direcție radială este implementată printr-un proces de dilatare a rețelei de discretizare. Ecuația de continuitate a fluidului incompresibil este:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.78)$$

Ecuația (2.78) poate fi integrată și se obține viteza radial a jetului, v :

$$v = -\frac{r}{2} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (2.79)$$

Rețeaua de discretizare este dilatată radial cu o rată dată de ecuația (2.79) în timp ce câmpul scalar se menține neschimbat la fiecare locație din rețea.

Pe de altă parte temperatura jetului se modifică în aval, fie scăzând, datorită antrenării aerului rece înconjurător din jet, fie crescând, datorită eliberării de căldură prin reacție chimică. Schimbarea temperaturii determină, la presiune constantă, o schimbare în densitatea fluidului, care este luată în calcul prin contracția volumică a rețelei de discretizare, pentru a asigura conservarea masei. Astfel dimensiunea rețelei, Δr , se schimbă conform formulei:

$$\Delta r^{n+1} = \Delta r^n \sqrt[3]{\frac{T^{n+1}}{T^n}} \quad (2.80)$$

unde n și $n+1$ sunt pași de timp consecutivi. Rădăcina cubică apare în ecuația (2.80) în ipoteza că dilatația rețelei de discretizare este izotropică (cu aceeași valoare în toate cele trei direcții spațiale).

III. Difuzia moleculară în domeniul unidimensional

Ecuațiile (2.72, 2.73) pot fi rescrise pe domeniului unidimensional radial, astfel:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Y_k}{\partial t} &= \frac{1}{\rho r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho r \left(D_k \frac{\partial Y_k}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{\rho} \omega_k \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{1}{\rho r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\rho r \left(D_T \frac{\partial Y_k}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{\rho} \omega_T \end{aligned} \quad (2.81)$$

Ecuațiile de mai sus sunt integrate numeric pe rețeaua de discretizare la fiecare pas de timp folosind ecuația (2.80), și la un pas de timp ales, din motive de stabilitate numerică, ca o funcție de dimensiunea radială a rețelei de discretizare:

$$\Delta t = CFL \frac{(\Delta r)^2}{\max(D_k, D_T)} \quad (2.82)$$

unde CFL este numărul Courant – Friederichs – Lewy

Poziția axială corespunzătoare timpului de calcul curent este dată de ecuația (2.76), iar viteza axială corespunzătoare este determinată de ecuația (2.74).

IV. Amestecul turbulent în domeniul unidimensional

Convecția turbulentă este simulată printr-o procedură numerică ce întrerupe integrarea numerică a ecuației (2.82) modelând acțiunea vârtejurilor turbulente asupra câmpului scalar. Pentru a putea implementa simularea vârtejurilor turbulente, trei elemente trebuie să fie specificate: dimensiunea vârtejului, locația sa și frecvența de apariție a vârtejului.

Dimensiunea vârtejului, l , este aleator aleasă pe baza unei funcții de distribuție a probabilității determinate de legi de scalare ale zonei inerțiale [98], în gama cuprinsă între lungimea scalei lui Kolmogorov η și lungimea scării integrale L :

$$f(l) = \frac{5}{3L} \frac{1}{\left(\frac{L}{\eta}\right)^{\frac{5}{3}} - 1} \left(\frac{l}{L}\right)^{\frac{8}{3}} \quad (2.83)$$

unde scara lui Kolmogorov este dată de relația:

$$\frac{\eta}{L} = K \text{Re}^{-\frac{3}{4}} \quad (2.84)$$

Deoarece algoritmul nu admite folosirea de funcții de distribuție a probabilității multiple pentru determinarea poziției vârtejului, este necesară o distribuție de probabilitate unică, capabilă să modeleze ambele comportamente ale variației intensității turbulente, descrise mai sus.

Astfel, funcția de distribuție de probabilitate trebuie să fie cvasi-constantă de-a lungul jetului și să scadă destul de repede în afara jetului. Distribuția gaussiană bimodală este cea mai potrivită pentru acest scop, cu cele două distribuții gaussiene componente centrate la marginile jetului. În vederea determinării celei mai potrivite variante, mai multe distribuții au fost testate și sunt prezentate în Fig.2.5.

V. Reacția chimică

Singura cerință pentru mecanismul reacției este să fie descris de către o subrutină FORTRAN de tip CHEMKIN [104].

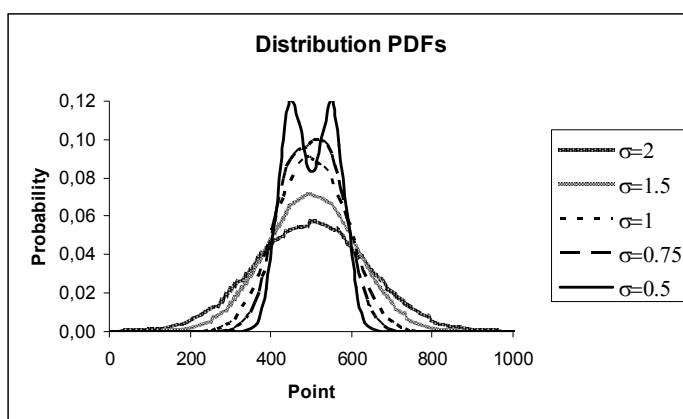


Fig.2.5- Distribuția gaussiană bimodală pentru câteva variante diferite

2.5 Descrierea algoritmului numeric tridimensional folosit

Pentru rezolvarea numerică a ecuațiilor prezentate în secțiunea anterioară, programul ANSYS CFX [1] utilizează un algoritm numeric segregat, secvențial, care are ca pași principali formarea matricelor caracteristice, asamblarea acestora și soluționarea sistemului rezultat pentru fiecare grad de libertate în parte.

Rezultatele numerice prezentate aici au fost obținute utilizându-se modelul RNG $k - \epsilon$, pe baza testării comparative a diferitelor modele de turbulență disponibile. Modelul de combustie ales în simulările tridimensionale efectuate de autor este și modelul de combustie EDM extins, din cauza limitărilor resurselor de calcul disponibile.

Detalii suplimentare despre modul de funcționare al programului *ANSYS CFX* sunt prezentate în teza de doctorat.

CAPITOLUL 3 Cercetări experimentale.

3.1. Amenajarea experimentală

Obiectivele experimentelor

Obiectivul principal al experimentelor a urmărit dezvoltarea unei baze de date în vederea proiectării sistemelor de postcombustie în turbomotoare utilizând combustibili gazeși. Acest obiectiv a fost atins prin realizarea următoarelor seturi de experimente:

1. Măsurători experimentale laser PIV în jetul liber al turbomotorului, fără montarea modelului de postcombustie realizat;
2. Măsurători experimentale laser PIV pe modelul de postcombustie realizat, fără aprindere;
3. Măsurători experimentale laser PIV, PLIF, Termometrie Rayleigh, pe modelul de postcombustie realizat, cu aprindere;

Măsurătorile experimentale s-au focalizat pe determinarea câmpurilor de viteze medii, precum și a câmpurilor de fluctuații turbulente ale vitezei în jetul liber al turbomotorului, fără montarea modelului de postcombustie realizat și în avalul sistemului de postcombustie, iar în cazul măsurătorilor experimentale pe modelul experimental cu postcombustie cu aprindere se determină și câmpul mediu al concentrației radicalului OH, care indică poziția medie a frontului de flacără, câmpul fluctuațiilor turbulente ale radicalului OH, și câmpul mediu de temperatură.

Descrierea standului experimental

- Standul de experimentare folosește ca sursă de gaze de ardere un turbomotor Garrett 30–67, prezentat în Fig. 3.1, capabil să furnizeze la ieșire o viteză maximă de 150 m/s și o temperatură maximă de 600 K.
- Turbomotorul, prin ajutorul de evacuare, permite realizarea însămânțării cu particule de oxid de titan, necesare metodei PIV, la capătul căruia există accesul optic necesar, după cum se arată în Fig. 3.1.
- Standul de experimentare este echipat cu un sistem de postcombustie proiectat și executat în concepție proprie în cadrul proiectului și care poate ridica temperatura la evacuare

până la 1800 K. Camera de postcombustie este descrisă în detaliu în Cap. 3.1.4. Principalele componente ale instalației experimentale sunt descrise mai în detaliu în cele ce urmează:

- a) Generatorul de gaz - Motor Garrett 30-67 (Fig. 3.1) [105]



Fig. 3.1 - Generatorul de gaz

Pentru reducerea zgomotului produs de standul de experimentare, s-a realizat în cadrul Institutului COMOTI un amortizor de zgomot pasiv ce are în componența sa material fonoabsorbant, vată minerală bazaltică cu densitate de aproximativ 80 kg/m^3 [106]

Descrierea modelului experimental pentru sistemul de postcombustie
”Treapta I a stabilizatorului de flacără,,

Sistemul de postcombustie realizat vedere ansamblu general (Fig. 3.3):

- Dimensiuni generale: $L = 168 \text{ mm}$, $h = 228 \text{ mm}$, $l = 330 \text{ mm}$
- Stabilizator de flacără neaerodinamic, tip “V” cu deschiderea de 60 grade.

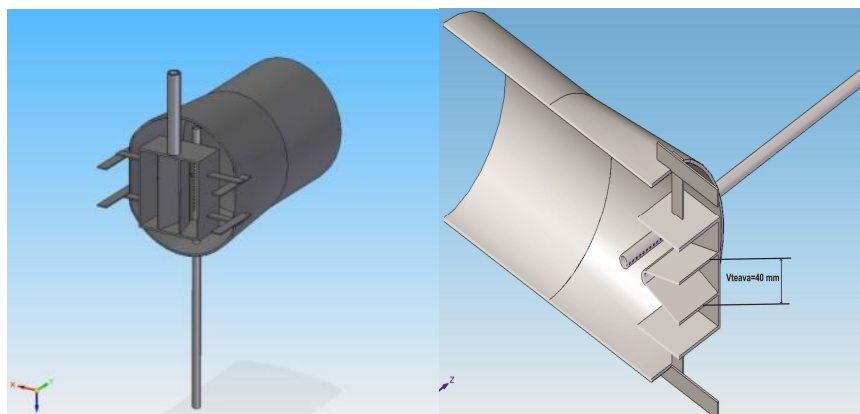


Fig. 3.3 - Vedere de ansamblu general și secțiune transversală postcombustie

Instrumentația experimentală

Programul de măsurători experimentale desfășurat a vizat măsurarea câmpului de viteze instantanee, temperaturi medii și concentrații instantanee ale radicalului OH în gazele de ardere din avalul sistemului de postcombustie. Metodele de măsurare utilizate în cadrul experimentărilor au folosit metode de spectroscopie LASER, și anume metoda „Particle Image Velocimetry” (PIV) pentru viteze, metoda “Planar Laser Induced Fluorescence” (PLIF) pentru concentrația radicalului OH, și Termometria Rayleigh pentru temperatură.

În cele ce urmează se va prezenta o trecere în revistă a modului de funcționare și a instrumentării specifice celor trei metode experimentale.

Particle Image Velocimetry (PIV)

- Metoda presupune o așa numită „însămânțare” a fluidului de lucru, adică introducerea în curgere a unor particule solide fine, în cazul de față de oxid de titan, și iluminarea zonei de măsurat cu un fascicul Laser de intensitate medie, emis simultan cu declanșarea a două camere foto rapide care înregistrează imaginea astfel formată [107].
- Prin procesarea perechii de imagini astfel capturate se determină deplasarea particulelor solide din curgere și, astfel, evaluarea tuturor componentelor vitezei (vezi Fig. 3.8)

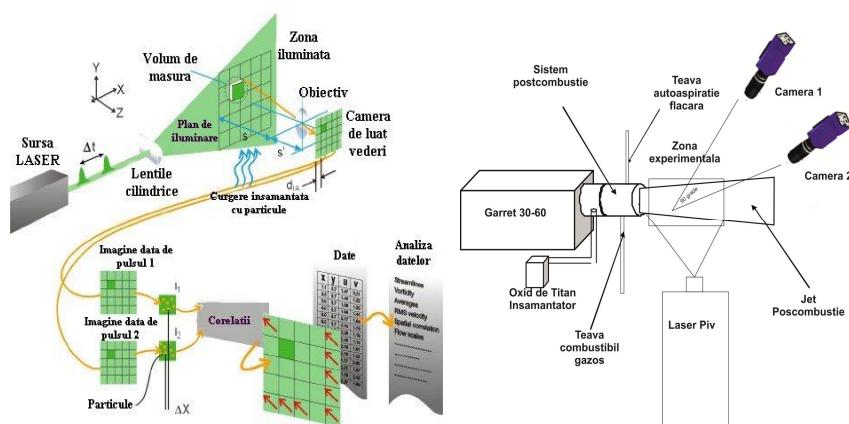


Fig. 3.8 - Modul de funcționare a PIV(stanga) și amenajarea standului experimental (dreapta)

Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF)

Tehnica de măsurare PLIF - Fluorescența indusă prin laser, în plan (Planar Laser Induced Fluorescence), este o tehnică optică de diagnosticare folosită pentru investigarea curgerilor reactive a gazelor pentru determinarea concentrațiilor (fracțiilor molare) ale diverselor specii chimice. O scurtă descriere este prezentată în cele ce urmează, iar o schemă a metodei este prezentată în Fig. 3.9. Când radiația Laser este reglată la o lungime de undă specifică, va excita o anumită specie (moleculă) din fluxul de gaze supus măsurătorii, către un nivel mai mare de energie. Fluorescența se produce atunci când această stare de excitație

dispare și molecula revine la nivelul său fundamental emițând radiație pe o lungime de undă mai mare decât radiația laser inițială. Semnalul fluorescent poate fi considerat direct proporțional cu concentrația de OH dacă fenomenul de stingere locală a flăcării este neglijabil [108], cum este și cazul flăcării la presiune atmosferică studiate aici. În cazul în care concentrația de OH poate fi calculată într-un punct, atunci se poate găsi o relație directă între semnalul fluorescent și concentrația de OH, formând astfel baza pentru calibrare. Mai multe detalii despre tehnica PLIF pot fi găsite în literatura de specialitate [109, 110]. Pentru măsurătorile concentrațiilor de OH prezentate aici s-a folosit o soluție de colorant numită Coumarin 153 [111]

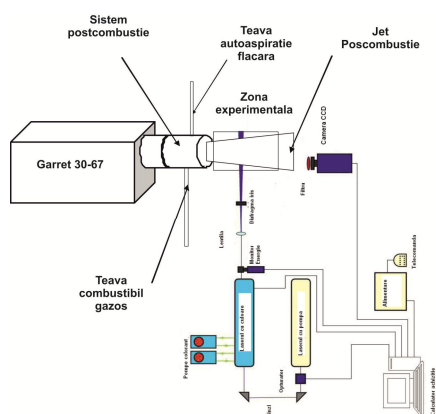


Fig. 3.9– Schema sistemului de măsură PLIF

Imaginile achiziționate cu sistemul prezentat mai sus conțin doar informații calitative privind concentrația OH-ului, pe baza intensităților relative ale emisiei de fotoni prin fluorescență. Pentru obținerea de informații cantitative este necesară definirea unei corelații între intensitatea imaginii procesate și un anumit nivel al concentrației de OH. Acest calcul poate fi făcut fie utilizând un program de cinetică a arderii în condiții de echilibru chimic, (de exemplu CHEMKIN sau, Stanjan [109], etc.), fie pe baza unor date deja calculate și prezentate în literatura de specialitate. În acest caz s-a preferat a doua variantă, utilizându-se datele de calibrare prezentate în referința [109].

Termometria Rayleigh

Termometria Rayleigh (TR) se bazează pe fenomenul numit Rayleigh Scattering (RS), care, spre deosebire de LIF (Fluorescența indusă prin laser) este un fenomen non-rezonant de dispersie elastică a luminii sau a altor radiații electromagnetice în particule mult mai mici decât lungimea de undă a luminii. Termometria este în timp real.

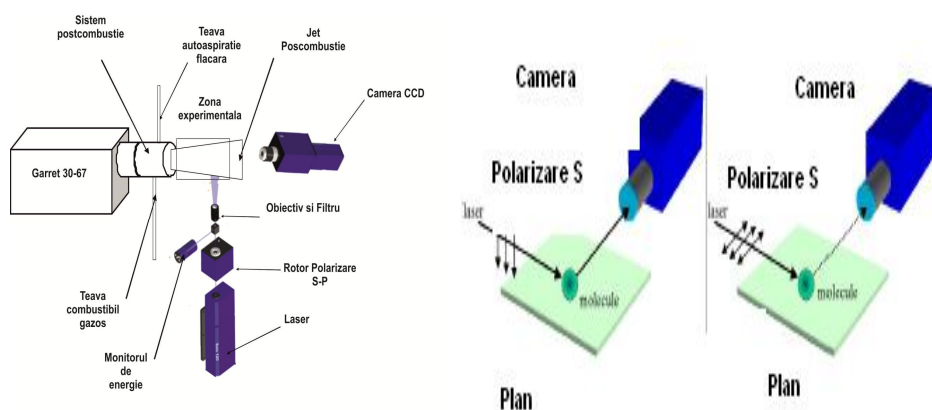


Fig. 3.14 - Configurarea experimentală Fig. 3.17 - Modalitățile de polarizare a luminii laser S și P [112]

TR este o metodă preferată de măsurare a temperaturii (Fig. 3.14), dacă media secțiunii transversale a amestecului de gaze este cunoscută. La presiune constantă, densitatea moleculară și, prin urmare, intensitatea luminii emise, este invers proporțională cu temperatura din cauza legii gazului ideal.

Intensitatea dispersiei Rayleigh a luminii este maximă la polarizarea S și minimă pentru polarizarea P (Fig. 3.17).



Fig. 3.20 - Amenajarea experimentală - postcombustia în timpul funcționării (în stânga) și instalația laser LIF în timpul calibrării (în dreapta)

3.2. Măsurători laser PIV experimentale în jetul liber al turbomotorului, fără montarea modelului de postcombustie realizat

Pe standul de experimentare descris în paragraful anterior, s-a procedat mai întâi la determinarea, prin metoda de măsurare PIV, a câmpului de viteze în avalul turbomotorului în jetul liber. Timpul între două impulsuri LASER a fost de 5 μ s, iar rezultatele au fost obținute

în urma a 5 serii a câte 75 de imagini duble (provenite de la cele două camere fotografice ale sistemului spectroscopic tridimensional PIV).

În toate seturile de date prezentate în cele ce urmează, se vor defini trei direcții spațiale, după cum urmează:

- axială, de-a lungul curgerii principale prin modelul experimental al sistemului de postcombustie, și de-a lungul axei de simetrie;
- radială, perpendicular pe curgerea principală și de-a lungul liniei imaginare care ar “închide” “V”-ul format de stabilizatorul de flacără;
- direcția anvergurii, perpendicular pe curgerea principală și de-a lungul anvergurii stabilizatorului de flacără, adică al generatoarelor “V”-ului.

Pentru o evaluare cantitativă a câmpului de viteze din avalul turbomotorului, se prezintă în continuare variația componentelor vitezei medii de-a lungul axei de simetrie a turbomotorului (Fig. 3.24, 3.25), respectiv pe direcție radială, a componentelor vitezei U și V

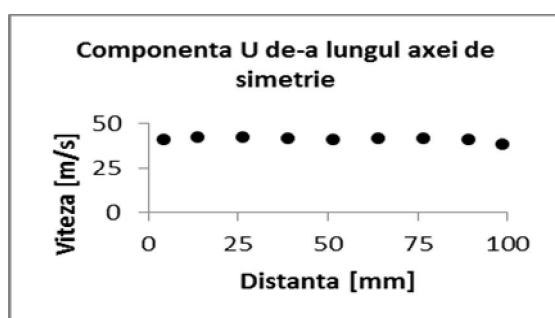


Fig. 3.24 – Variația componentei axiale a vitezei medii în direcție axială a turbomotorului în jetul liber

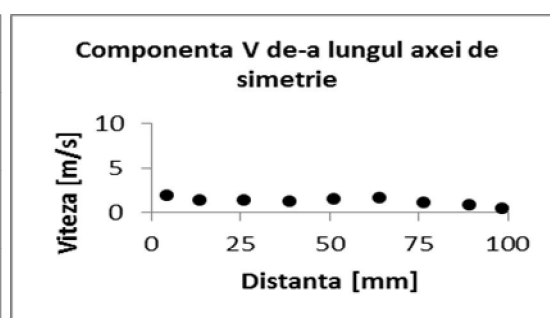


Fig. 3.25 – Variația componentei radiale a vitezei medii în direcție axială a turbomotorului în jetul liber

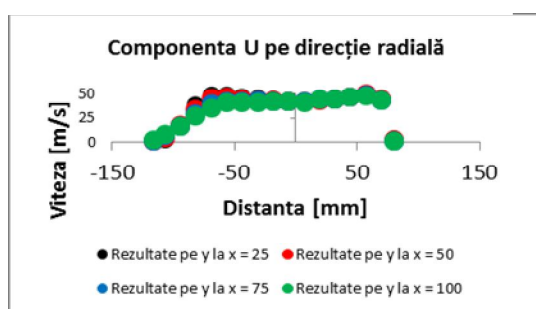


Fig. 3.27 – Variația componentei axiale U a vitezei medii în direcție radială la distanța axială de $x = 25$, $x = 50$, $x = 75$, $x = 100$ mm în jetul liber

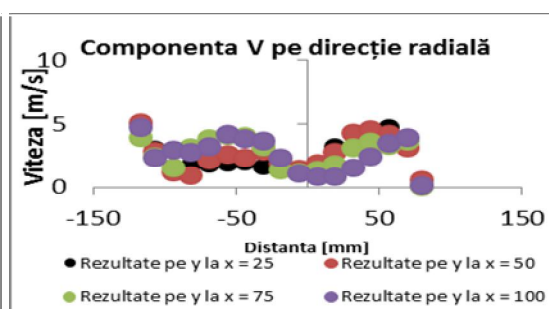


Fig. 3.28 – Variația componentei radiale V a vitezei medii în direcție radială la distanța axială de $x = 25$, $x = 50$, $x = 75$, $x = 100$ mm în jetul liber

Se poate observa că, pe măsură ce jetul se extinde în aval, influența formei jetului dat de turbină dispare și profilul vitezei își recâștigă caracteristica formei parabolice, tipică pentru un jet rotund turbulent.

Au fost măsurate experimental, de asemenea, și variațiile axiale și radiale ale fluctuațiilor turbulente ale vitezelor în jetul liber al turbomotorului, date care sunt prezentate în teza de doctorat.

3.3 Măsurători laser PIV experimentale pe modelul de postcombustie realizat, fără aprindere

Pe standul de experimentare descris în paragraful anterior, s-a procedat mai întâi la determinarea, prin metoda de măsurare PIV, a câmpului de viteze în avalul sistemului de postcombustie fără aprinderea flăcării secundare (a postcombustiei).

Timpul între două impulsuri LASER a fost de 5 μ s, iar rezultatele au fost obținute în urma a 5 serii a câte 75 de imagini duble (provenite de la cele două camere fotografice ale sistemului spectroscopic tridimensional PIV).

Pentru o evaluare cantitativă a câmpului de viteze din avalul sistemului de postcombustie fără aprinderea postcombustiei, se prezintă în continuare variația componentelor vitezei medii de-a lungul axei de simetrie a sistemului de postcombustie (Fig. 3.38 și 3.39), respectiv pe direcție radială, a componentelor vitezei U și V în 8 locații axiale diferite ($x = 25$ mm, $x = 50$ mm, $x = 75$ mm, $x = 100$ mm, $x = 125$ mm, $x = 150$, $x = 175$ mm și $x = 200$ mm - Fig. 3.41 și 3.42).

În avalul stabilizatorului de flacără al sistemului de postcombustie viteza medie axială este negativă creind o zona de recirculare unde viteza negativa maximă este în jur de 10 m/s la o distanța aproximativă de 25 mm de la marginea lui. Lungimea zonei de recirculare este în jur de 55 mm. După terminarea zonei de recirculare viteza axială crește gradat în aval apropiindu-se de valoarea jetului liber în jur de 30 m/s, reflectând conservarea energiei, pe măsură ce deficitul de viteza creat de stabilizatorul de flacără dispare. Atât viteza radială cât și viteza pe direcția anvergurii sunt mici și tind să descrească spre aval, pe măsură ce curgerea principală devine axială.

Pe direcție radială, viteza axială medie în zona din apropierea stabilizatorului de flacără prezintă un minim în zona axei de simetrie, corespunzător zonei de recirculare. De aici, pe măsură ce raza crește, componentele axiale cresc și ele prin stratul de forfecare care separă zona de recirculare de jeturile libere care ocolesc stabilizatorul de flacără.

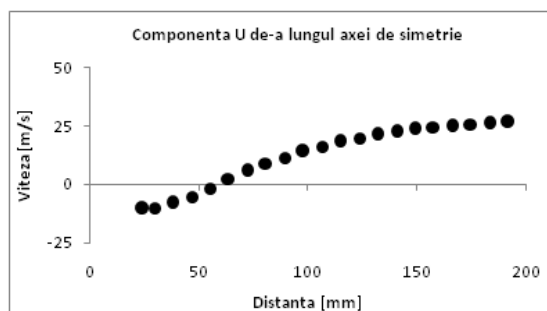


Fig. 3.38 – Variația componentei axiale a vitezei medii în direcție axială fără aprinderea postcombustiei

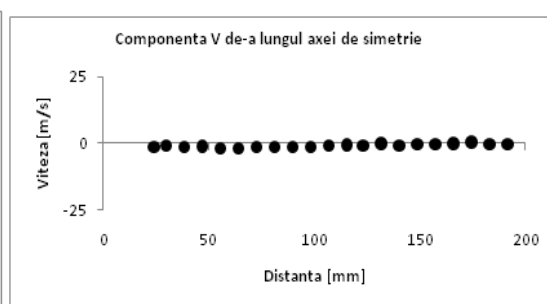


Fig. 3.39 – Variația componentei radiale a vitezei medii în direcție axială fără aprinderea postcombustiei

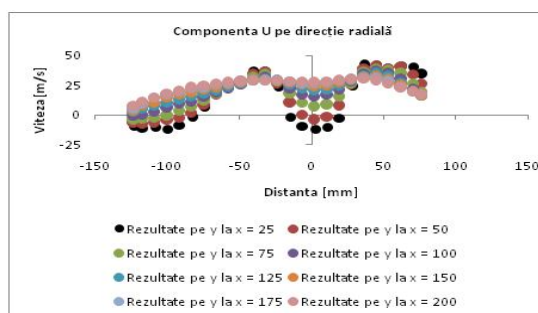


Fig. 3.41 – Variația componentei axiale U a vitezei medii în direcție radială la distanța axială de $x = 25$, $x = 50$, $x = 75$, $x = 100$, $x = 125$, $x = 150$, $x = 175$, $x = 200$ mm fără aprinderea postcombustiei

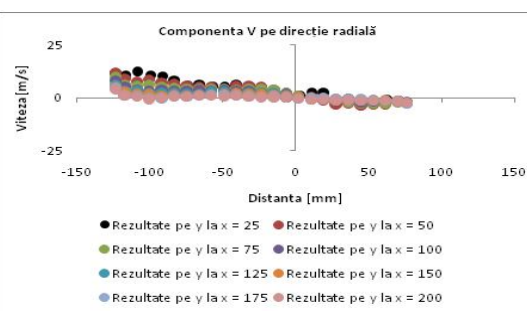


Fig. 3.42 – Variația componentei radiale V a vitezei medii în direcție radială la distanța axială de $x = 25$, $x = 50$, $x = 75$, $x = 100$, $x = 125$, $x = 150$, $x = 175$, $x = 200$ mm fără aprinderea postcombustiei

Au fost măsurate experimental, de asemenea, și variațiile axiale și radiale ale fluctuațiilor turbulente ale vitezelor în avalul modelului experimental de postcombustie, fără aprindere, date care sunt prezentate în teza de doctorat.

3.4. Măsurători laser PIV experimentale pe modelul de postcombustie realizat, cu aprindere

Măsurători experimentale ale vitezei

Pe același stand de experimentare descris anterior, s-a reluat programul de experimentare prezentat în paragraful precedent însă în acest caz măsurătorile au avut loc după aprinderea flăcării secundare (a postcombustiei). Comparată cu curgerea la rece, expansiunea volumetrică datorată căldurii eliberate prin reacție chimică se reflectă prin creșterea dimensiunii zonei de recirculare și a ariei secțiunii radiale. Lungimea zonei de recirculare este acum în jur de 90 mm, iar valoarea negativă a vitezei este de 25 m/s. În câmpul îndepărtat viteza jetului este de aproximativ 35 m/s.

Prin aceeași metodă de măsurare PIV, cu aceleași reglaje ale sistemului spectroscopic tridimensional PIV, s-a procedat la măsurarea câmpului de viteze în avalul sistemului de

postcombustie, Fig.3.49 prezintă câmpul de viteze instantanee în avalul sistemului de postcombustie, fără aprinderea acesteia, Fig. 3.50 și 3.51 prezintă câmpul de viteze medii, respectiv fluctuația turbulentă (abaterea medie pătratică) a câmpului de viteze instantanee în avalul sistemului de postcombustie, cu aprinderea acesteia.

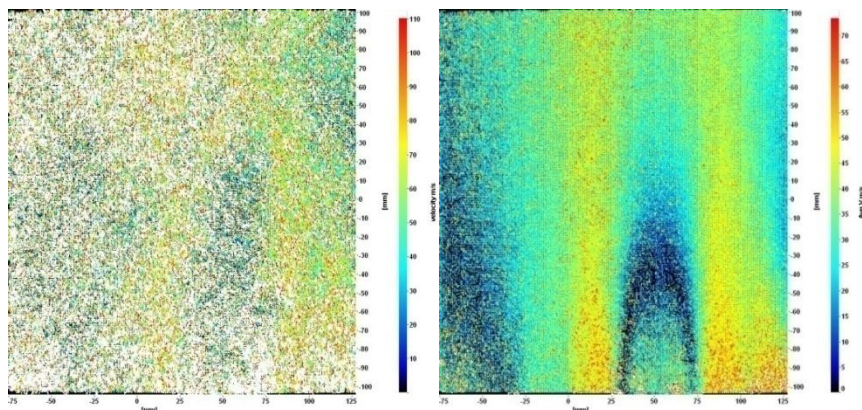


Fig. 3.49 – Câmpul de viteze instantanee cu aprinderea postcombustiei

Fig. 3.50 – Câmpul de viteze medii cu aprinderea postcombustiei

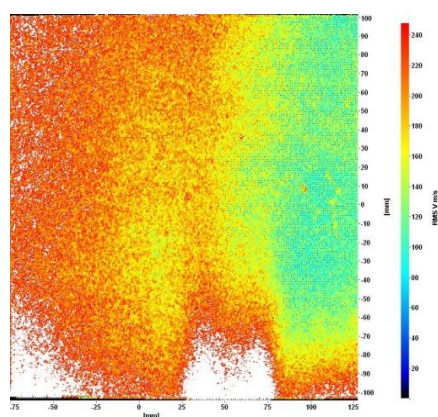


Fig. 3.51 – Câmpul de fluctuații turbulente ale vitezei cu aprinderea postcombustiei

Pentru o evaluare cantitativă a câmpului de viteze din avalul sistemului de postcombustie cu aprinderea flăcării secundare, se prezintă în continuare variația componentelor vitezei medii de-a lungul axei de simetrie a sistemului de postcombustie (Fig. 3.52 și 3.53), respectiv pe direcție radială, a componentelor vitezei U , V și respectiv W în 8 locații axiale diferite ($x = 25$, $x = 50$ mm, $x = 75$ mm, $x = 100$ mm, $x = 125$ mm, $x = 150$ mm, $x = 175$ mm, și $x = 200$ mm - Fig. 3.55 , 3.56.)

La distanță mare către aval, componenta axială a vitezei depășește valoarea vitezei la intrarea în sistemul de postcombustie, până la 35 m/s la marginea domeniului de măsurare, datorită aportului de energie prin conversia energiei chimice stocate în combustibil mai întâi în căldură, în decursul procesului de ardere, și ulterior în energie cinetică.

Componentele radială și în direcția anvergurii sunt, și în acest caz, mici la axa de simetrie a sistemului de postcombustie, valorile ușor mai mari înregistrate în cazul

componentei în direcția anvergurii datorându-se imperfecțiunilor amenajării experimentale (curenți de aer, reflexii, neuniformități ale particulelor de însămânțare). Valorile ambelor componente sunt mai mari imediat în avalul stabilizatorului de flacără, datorită asimetriilor geometriei la evacuarea generatorului de gaz.

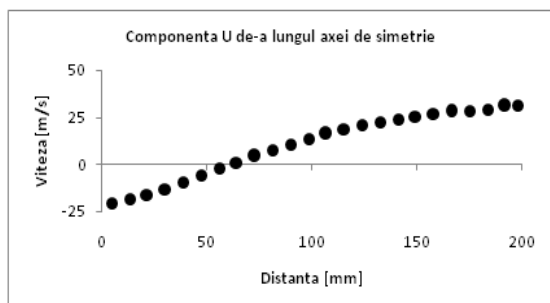


Fig. 3.52 – Variația componentei axiale a vitezei medii în direcție axială cu aprinderea postcombustiei

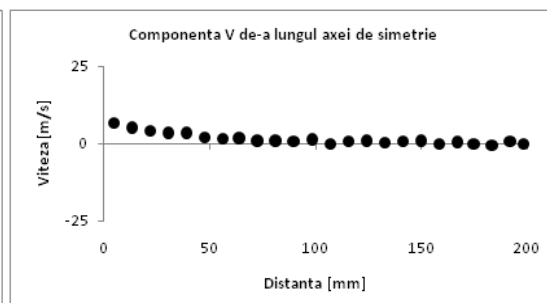


Fig. 3.53 – Variația componentei radiale a vitezei medii în direcție axială cu aprinderea postcombustiei

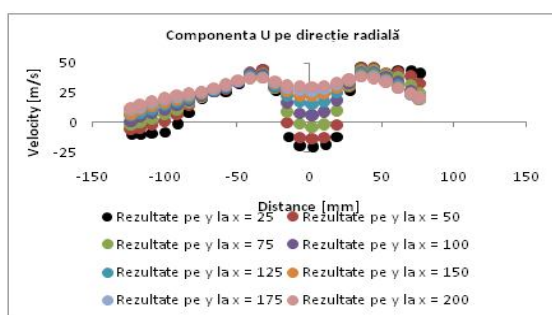


Fig. 3.55 – Variația componentei axiale U a vitezei medii în direcție radială la distanța axială de $x = 25, x = 50, x = 75, x = 100, x = 125, x = 150, x = 175, x = 200$ mm cu aprinderea postcombustiei

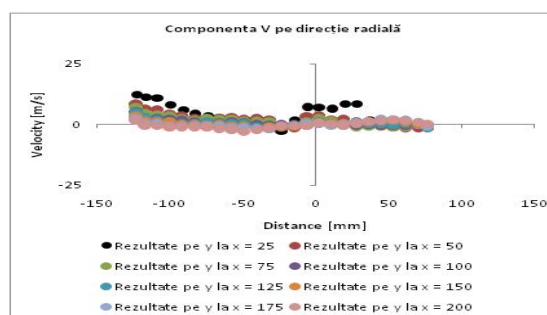


Fig. 3.56 – Variația componentei radiale V a vitezei medii în direcție radială la distanța axială de $x = 25, x = 50, x = 75, x = 100, x = 125, x = 150, x = 175, x = 200$ mm cu aprinderea postcombustiei

În direcție radială, regiunea cu viteza negativă este mai mare, în jur de 80 mm decât în curgerea nereactivă unde este în jur de 70 mm.

Au fost măsurate experimental, de asemenea, și variațiile axiale și radiale ale fluctuațiilor turbulente ale vitezelor în avalul modelului experimental de postcombustie, cu aprindere, date care sunt prezentate în teza de doctorat.

Măsurători experimentale ale concentrației radicalului OH (LIF)

Rezultatele programului experimental descris anterior sunt prezentate în continuare. Fig. 3.62 și 3.63 prezintă câmpul mediu, respectiv câmpul de fluctuații turbulente ale concentrațiilor de OH într-un plan ce conține axa sistemului de postcombustie. De la bun început trebuie menționat că radicalul OH este o specie chimică ce se creează și se distruge foarte rapid în procesul de ardere [2]. Din acest motiv, prezența sa poate fi detectată numai în frontul de flacără, constituind o indicație foarte precisă asupra poziției acestuia. Din această

cauză, pe parcursul acestei lucrări, discuțiile despre poziția și comportamentul frontului de flacără se vor baza pe această observație, fără a o mai reitera.

Așa cum se observă în Fig. 3.62, poziția medie a flăcării coincide cu zona de recirculare care se formează în avalul stabilizatorului de flacără, așa cum s-a arătat anterior. Se poate observa, de asemenea, prezența fenomenului de „baleiere turbulentă” („*turbulent brush*”) prin care grosimea medie a frontului de flacără este mult mai mare decât grosimea lui instantanee. Acest fenomen ia naștere din cauza intermitenței turbulente, care face ca un anumit punct din spațiu din preajma frontului de flacără să fie uneori în interiorul acestuia, iar alteori în afara sa, din cauza fluctuațiilor turbulente ale flăcării. Astfel, după mediere, în locul zonei înguste care definește frontul unei flăcări laminare, ia naștere o zona mult îngroșată, în care câmpurile mediate au caracteristici parțial corespunzătoare frontului de flacără, parțial zonei de preîncălzire, și parțial zonei de oxidare [58].

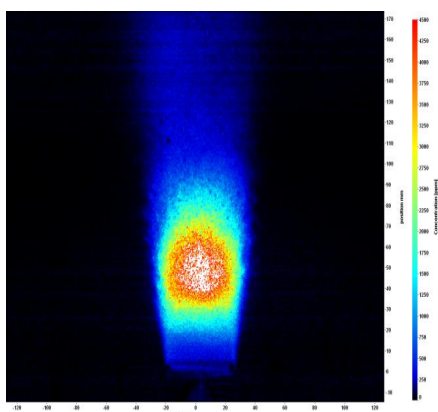


Fig. 3.62 – Concentrațiile medii de OH în plan axial

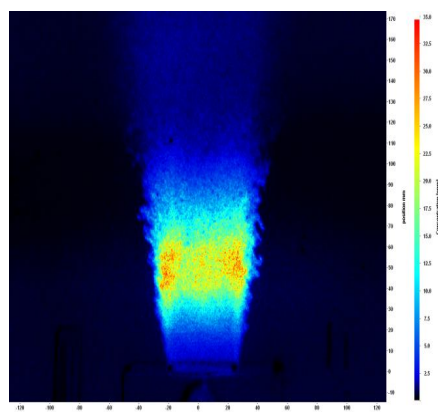


Fig. 3.63 – Fluctuația concentrațiilor de OH în plan axial

Fluctuațiile turbulente ale concentrației de OH (Fig. 3.63) prezintă un maxim pe o zonă inelară care reprezintă intersecția dintre zona în care fluctuează frontul de flacără (baleierea turbulentă menționată anterior), și zona de înaltă turbulență din stratul de forfecare ce desparte zona de recirculare din avalul stabilizatorului de flacără de curentul liber ce trece prin carcasa postcombustiei, ocolind stabilizatorul.

Pentru o mai bună apreciere a rezultatelor cantitative ale măsurătorilor experimentale, Figurile 3.64 și 3.65 prezintă variația mediei, și respectiv a fluctuației turbulente a concentrației de OH de-a lungul axei de simetrie a instalației experimentale de postcombustie, iar Fig. 3.66, respectiv Fig. 3.67, variațiile mediei, și respectiv ale fluctuațiilor turbulente ale concentrației de OH de-a lungul unor axe radiale amplasate la, respectiv, 25, 50, 75, și 100 mm fata de bordul de fugă al stabilizatorului de flacără al instalației de postcombustie.

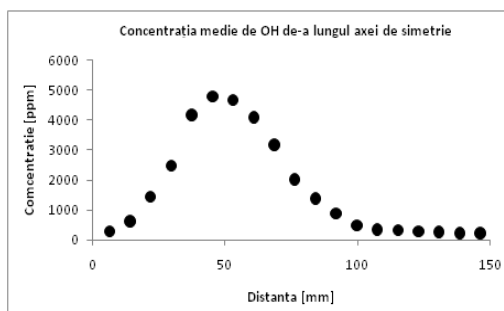


Fig. 3.64 – Variația concentrației medii de OH de-a lungul axei de simetrie

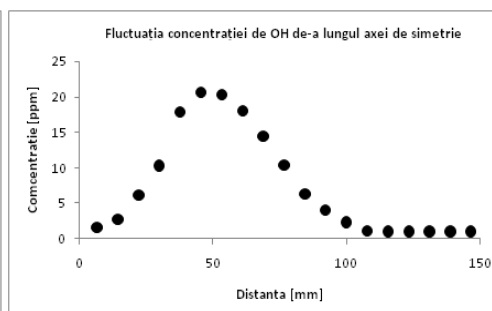


Fig. 3.65 – Variația fluctuației concentrației de OH de-a lungul axei de simetrie

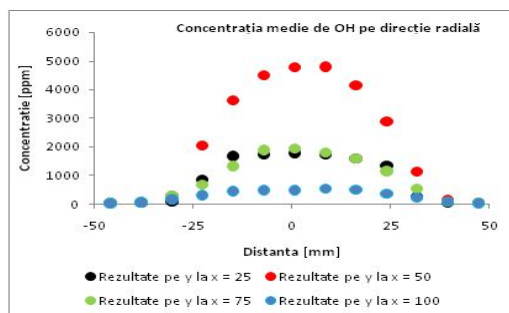


Fig. 3.66 – Variația concentrației medii de OH de-a lungul razei

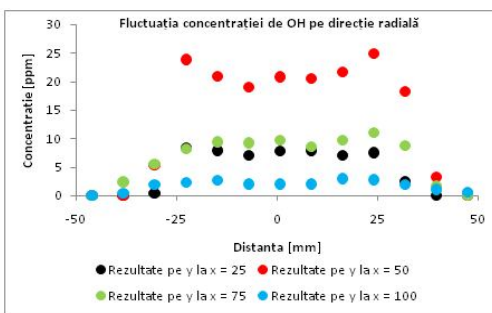


Fig. 3.67 – Variația fluctuației concentrației de OH de-a lungul razei

Măsurători experimentale ale temperaturii (Rayleigh)

Fig. 3.68 prezintă câmpul mediu de temperatură din avalul sistemului de postcombustie. Se poate observa o zonă de temperatură înaltă plasată la o mică distanță de stabilizatorul de flacără, în regiunea de intensitate maximă a zonei de recirculare discutate în secțiunea în care s-au prezentat măsurătorile PIV și LIF. Această regiune de temperatură maximă corespunde zonei de oxidare a flăcării preamestecate, acolo unde reacția de oxidare eliberează cea mai importantă cantitate de căldură.

În amontele acestei zone, în zona de inițiere a flăcării, în care au loc reacțiile de descompunere a combustibilului și reacțiile rapide de formare și distrugere a radicalilor liberi de tip OH, temperatura este mai scăzută, deoarece nu întreaga energie chimică a combustibilului a fost convertită în căldură. În aval, temperatura scade treptat, pe măsură ce aerul proaspăt rece din exteriorul flăcării, împreună cu fluxul secundar de gaze de ardere și aer provenit din generatorul de gaze, și el mai rece, sunt antrenate în jet și amestecate cu produșii de ardere fierbinții ai flăcării postcombustiei. Către exterior, la distanță față de jetul reactiv chimic, se poate observa ușoara încălzire treptată a aerului înconjurător de către flacără, prin radiație.

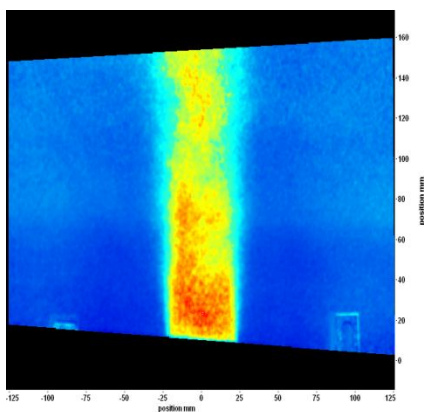


Fig. 3.68 - Câmpul mediu de temperatură din avalul sistemului de postcombustie

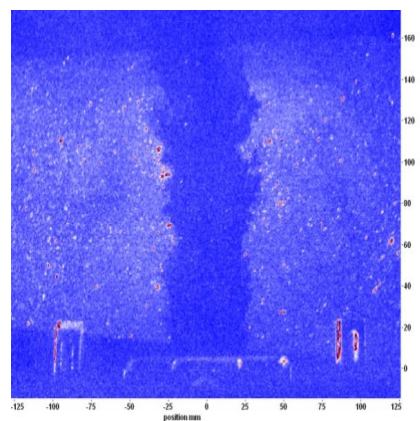


Fig. 3.69 - Imagine instantanee neprelucrată a semnalului Rayleigh

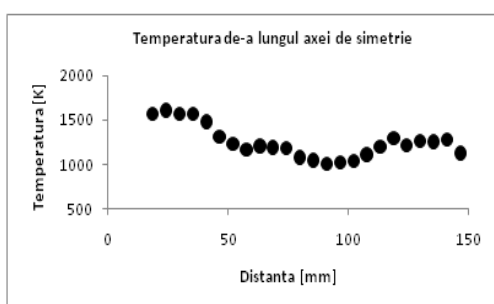


Fig. 3.70 - Profilul axial al temperaturii medii de-a lungul direcției axiale

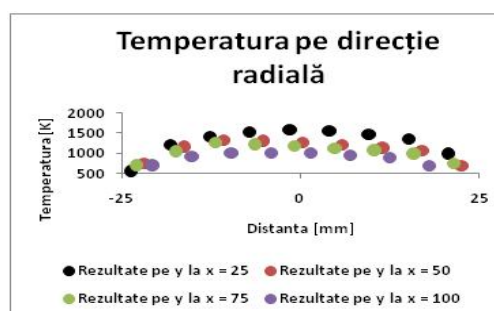


Fig. 3.71 - Profilul axial al temperaturii medii de-a lungul razei la o distanță axială de 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm

Cum metoda de măsurare Rayleigh nu permite determinarea temperaturilor instantanee, Fig. 3.69 prezintă o imagine instantanee neprelucrată a semnalului Rayleigh, în care se pot observa distorsiunile provocate de vârtejurile turbulente asupra flăcării și tendința de înfășurare a frontului de flacără în jurul nucleelor acestor vârtejuri turbulente.

În direcție axială (Fig. 3.70), tendința generală a temperaturii la axa de simetrie este de a scădea către aval. Ușoara creștere a temperaturii medii după 100 mm se datorează imperfecțiunilor amenajării experimentale care a permis formarea unor curenți de aer care au afectat flacăra, aceeași zonă ușor mai fierbinte fiind observabilă și în Fig. 3.71.

CAPITOLUL 4 Rezultatele simulării numerice unidimensionale

4.1. Rezultate simulării numerice unidimensionale ale jetului liber al turbomotorului, fără montarea modelului de postcombustie realizat

Algoritmul numeric descris în secțiunea 2.4 a fost aplicat la jetul de evacuare al turbomotorului Garrett 30 – 67 descris anterior, iar în această simulare ratele de reacție chimice sunt setate la valoarea zero. În această secțiune se vor prezenta rezultatele numerice, în comparație cu măsurătorile experimentale.

Viteza gazului la centrul secțiunii de evacuare (Fig. 4.1) a fost măsurată utilizând un anemometru cu fir încins YK 2005 AH. Viteza măsurată a fost de 185,00 m/s, această valoare fiind utilizată pentru inițializarea algoritmului numeric. În avalul motorului, distanța de la evacuarea acestuia a fost măsurată în direcția axei de simetrie a motorului, și au fost măsurate compoziția și temperatura gazului la fiecare locație axială, în axa de simetrie, cu ajutorul unui analizor de gaze model VARIOPLUS INDUSTRIAL



Fig. 4.1. - Amenajarea experimentală a turbomotorului Garrett 30 – 67

Variația axială a fracțiilor masice ale speciilor chimice și a temperaturii pe axa de simetrie a jetului sunt arătate în Fig.4.4, împreună cu datele măsurate (convertite în fracții masice). Acordul dintre datele măsurate și rezultatele simulării numerice este în general bun, permițând validarea rezultatelor numerice și în general mai bun în zona din amonte decât în zona din aval.

Rezultatele măsurătorilor sunt date în Tabelul 4.1.

Poziția	T	O ₂	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄
[m]	[K]	[% vol]	[% vol]	[% vol]	[% vol]	[% vol]
0	545.6	.1913	.012	.0528	.0002	.00013
0.5	466.3	.1988	.008	.0335	.0001	.00010
1.0	404.3	.2016	.003	.0129	.00005	.00007
5.0	336.6	.2059	.001	.0045	0	0
10.0	316.9	.2081	0	.0007	0	0

Tabelul 4.1. Măsurători experimentale ale compoziției chimice și temperaturii în jetul de evacuare al motorului

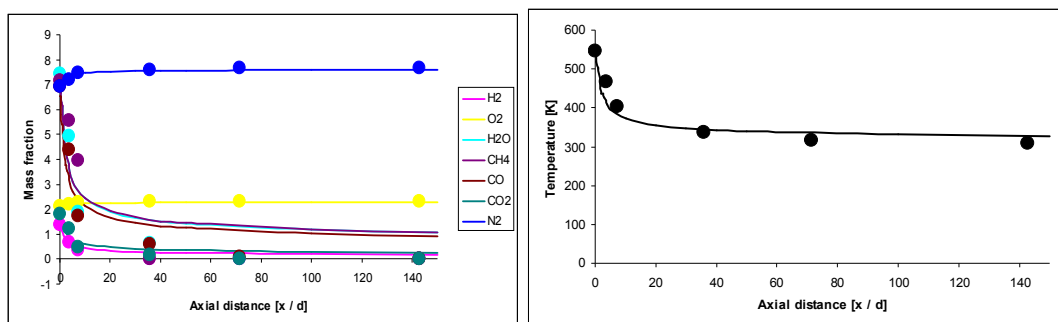


Fig. 4.4. - Profile axiale ale compoziției gazului (stânga) și temperaturii (dreapta) pe axa de simetrie. Liniile reprezintă rezultatele numerice, iar punctele, datele experimentale

4.2. Simularea numerică a flăcării într-un jetul circular turbulent, validată de măsurători experimentale din literatură

Algoritmul numeric descris în secțiunea 2.4 a fost aplicat la simularea numerică a unui binecunoscut experiment ale cărui rezultate sunt publicate în literatura de specialitate [116, 124], așa numitul experiment Sandia Flame D. În această secțiune se vor prezenta rezultatele numerice, în comparație cu măsurătorile experimentale.

Rezultate pe direcție axială

Fig. 4.9 prezintă profilul temperaturii medii de-a lungul axei de simetrie a flăcării, în timp ce Fig. 4.10 - 4.13 prezintă profilele mediate ale fracțiilor masice ale metanului, dioxidului de carbon, radicalului hidroxil și monoxidului de carbon. Temperatura în axa de simetrie a jetului crește în câmpul apropiat, pe măsură ce zona de reacție de temperatură înaltă se apropie de axa de simetrie și căldura este transportată radial către interior prin amestecare turbulentă și prin difuzie, până la o valoare de aproximativ 2000 K (Fig. 4.9).

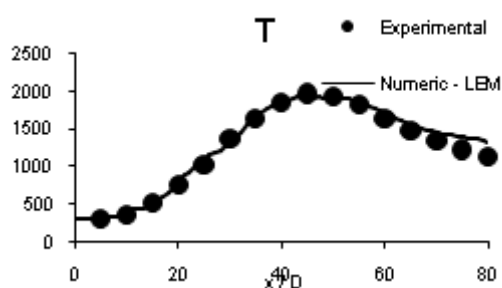


Fig.4.9. - Profilul temperaturii medii de-a lungul axei de simetrie

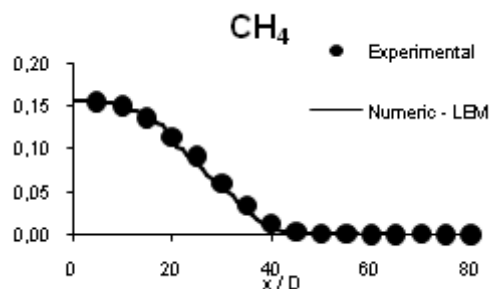


Fig.4.10. - Profilul fracției masice medii de CH₄ de-a lungul axei de simetrie

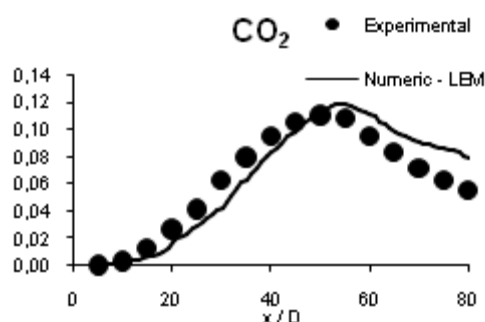


Fig.4.11. - Profilul fracției masice medii de CO₂ de-a lungul axei de simetrie

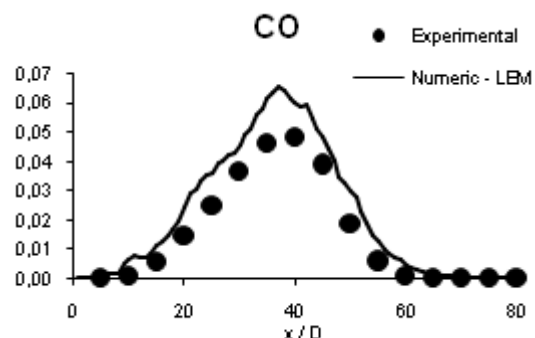


Fig. 4.12. - Profilul fracției masice medii de CO de-a lungul axei de simetrie

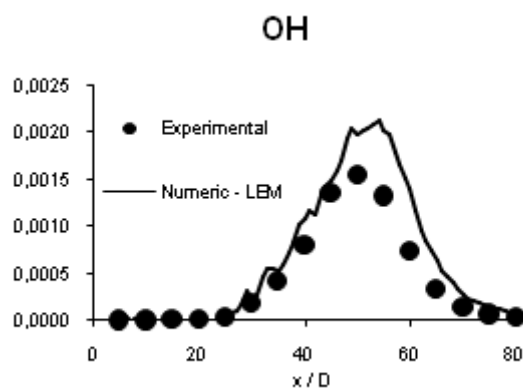


Fig. 4.13. - Profilul fracției masice medii de OH de-a lungul axei de simetrie

Rezultate radiale

Pentru confirmarea constatărilor anterioare, profilele radiale ale temperaturilor și ale celor patru specii chimice sunt prezentate în Fig. 4.14 (T), 4.15 (CH₄), 4.16 (CO₂), 4.17 (CO) și 4.18 (OH) în câmpul apropiat, la $x = 2 d_0$,

În câmpul apropiat simularea numerică arată o acuratețe bună, estimând corect profilul de temperatura (Fig.4.14) atât în afara jetului turbulent, unde fenomenele cele mai semnificative sunt convecția și difuzia căldurii din frontul de flacără, cât și în centrul jetului, unde reacțiile chimice nu au început încă din cauza temperaturii joase. De asemenea,

temperatura maximă din frontul de flacără, de circa 2000 K, este corect estimată de simularea LEM.

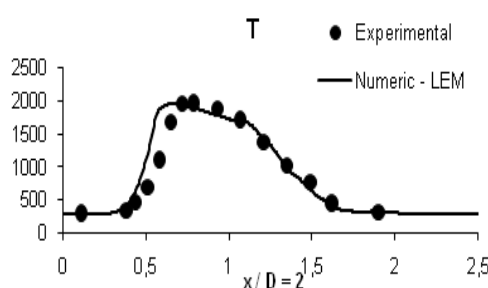


Fig.4.14. - Profilul radial al temperaturii medii la 2 diametre ale ajutorajului de evacuare a jetului

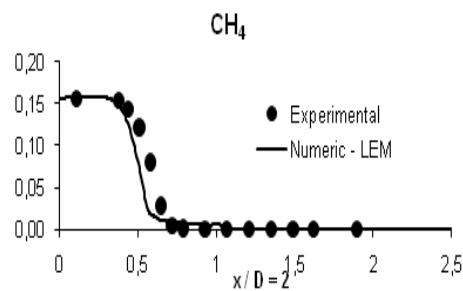


Fig. 4.15. - Profilul radial al fracției masice medii de CH₄ la 2 diametre ale ajutorajului de evacuare a jetului

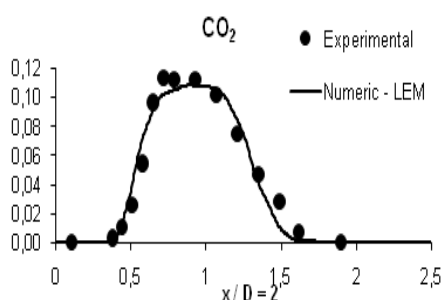


Fig. 4.16. - Profilul radial al fracției masice medii de CO₂ la 2 diametre ale ajutorajului de evacuare a jetului

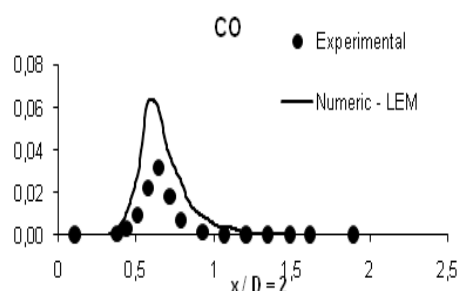


Fig. 4.17. - Profilul radial al fracției masice medii de CO la 2 diametre ale ajutorajului de evacuare a jetului

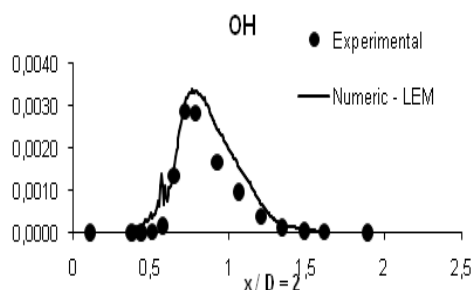


Fig. 4.18. - Profilul radial al fracției masice medii de OH la 2 diametre ale ajutorajului de evacuare a jetului

Simularea numerică arată o acuratețe bună, estimând corect profilul de temperatura (Fig.4.14) atât în afara jetului turbulent, unde fenomenele cele mai semnificative sunt convecția și difuzia căldurii din frontul de flacără, cât și în centrul jetului, unde reacțiile chimice nu au început încă din cauza temperaturii joase. De asemenea, temperatura maximă din frontul de flacără, de circa 2000 K, este corect estimată de simularea LEM.

Profilele radiale ale speciilor chimice își mențin tendința observată în cazul variațiilor axiale de a furniza o mai bună predicție a speciilor majore decât a radicalilor liberi. Este, de asemenea, remarcabilă predicția foarte bună a vârfului profilului de OH (Fig. 4.18) de către simularea numerică LEM, atât ca poziție cât și ca valoare.

CAPITOLUL 5 Analiza comparativă a rezultatelor numerice tridimensionale și a măsurătorilor experimentale

5.1. Rezultate ale simulării numerice tridimensionale a sistemului de postcombustie pentru curgerea nereactivă Domeniul de discretizare

Rezultatele prezentate în această secțiune au fost obținute prin integrarea numerică a ecuațiilor RANS. Motivul pentru care se folosește o simulare RANS în locul unei simulări LES, care este mult mai precisă, este lipsa resurselor de calcul necesare pentru dimensiunea problemei. Simularea numerică prezentată în această lucrare a fost efectuată folosind un program de calcul Computational Fluid Dynamics (CFD) comercial: ANSYS CFX [1]. Geometria simulării numerice reproduce geometria modelului experimental pentru a face posibilă comparația dintre rezultatele numerice și cele experimentale. Domeniul de calcul conține sistemul de postcombustie descris anterior și se extinde cu 450 mm în avalul stabilizatorului de flacără. În direcția radială domeniul de calcul măsoară 470 mm, centrat pe axa de simetrie a sistemului de postcombustie, iar în direcția anvergurii ajunge până la marginile camerei de postcombustie. Discretizarea domeniului de calcul este realizată printr-o rețea de calcul de rezoluție RANS formată din 1.049.626 elemente și 192.074 noduri. Rețeaua obținută este prezentată mai jos în Fig. 5.1.

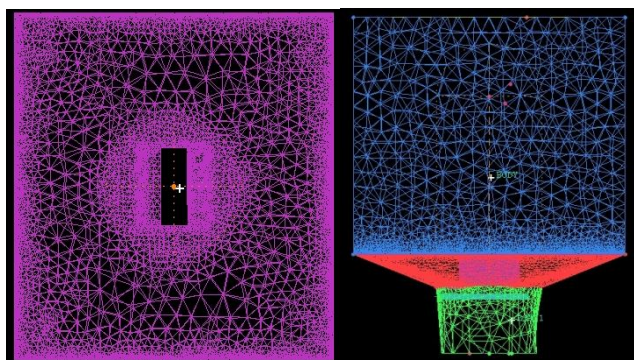


Fig. 5.1 Rețeaua de discretizare

Valoarea vitezei axiale la intrare a fost determinată prin măsurători experimentale (PIV) la evacuarea din turbomotor. Prin integrarea numerică a zonei de sub curba experimentală se poate determina debitul gazului de evacuare la intrarea în sistemul de

postcombustie la valoarea de 0,4523 kg/s. Folosind acest debit, s-a determinat viteza de la intrarea în domeniul de calcul, presupusă complet axială.

Câmpurile de viteze medii

Rezultatele experimentale au fost prezentate în detaliu în Capitolul 3. Aici, se vor prezenta rezultatele simulării numerice RANS în comparație cu aceste rezultate (Fig. 5.3 - 5.8)

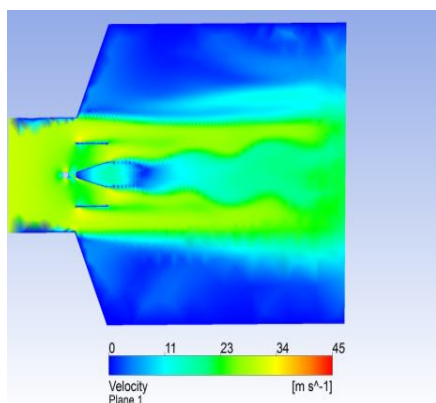


Fig. 5.3. Câmpul numeric de viteză medie

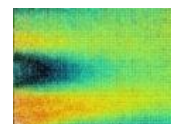


Fig. 5.4. - Câmpul experimental de viteză medie (Aceași scară de culoare ca în Fig. 5.3)

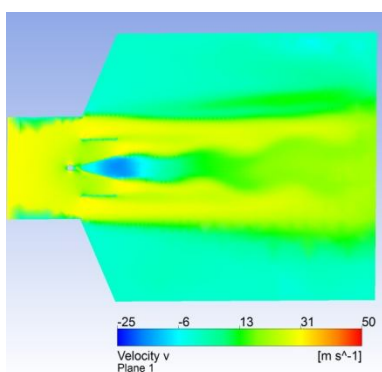


Fig. 5.5- Câmpul numeric de viteză medie axială

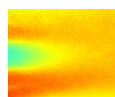


Fig. 5.6 -Câmpul experimental de viteză medie axială
(Aceași scară de culoare ca în Fig. 5.5)

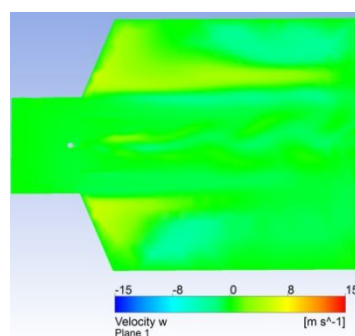


Fig.5.7. - Câmpul numeric de viteza medie radială

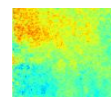


Fig. 5.8. - Câmpul experimental de viteză medie radială
(Aceași scară de culoare ca în Fig. 5.7)

Este important de notat că datele experimentale nu au putut fi înregistrate mai aproape de camera de postcombustie din cauza reflexiei razelor LASER pe modelul experimental. Pentru determinarea câmpurilor de viteze în aceasta regiune ar necesita plasarea corespunzătoare a unor ferestre de cuarț, astfel de măsurători putând furniza informații importante despre dinamica câmpului de curgere.

Profilele de viteze medii în direcție axială.

Pentru comparații cantitative între datele numerice și cele experimentale sunt prezentate împreună măsurătorile experimentale și rezultatele numerice ale profilelor variației vitezei medii axiale, radiale, și, respectiv, în direcția anvergurii de-a lungul axei de simetrie a sistemului de postcombustie (Fig. 5.9 - 5.10).

Ambele profile ale vitezei axiale surprind destul de bine zona de recirculare, unde vitezele sunt negative, ajungând la un maxim negativ de 10 m/s la o distanță de 25 mm în avalul bordului de fugă al stabilizatorului de flacără, în ambele cazuri. Lungimea zonei de recirculare este în jur de 55 mm, de asemenea foarte bine surprinsă atât de simularea numerică cât și de măsurătorile experimentale.

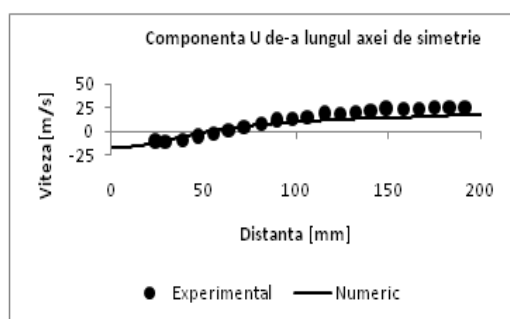


Fig. 5.9. - Profilele vitezei medii axiale de-a lungul axei de simetrie a camerei de postcombustie

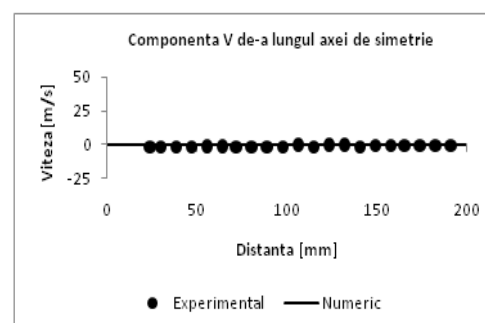


Fig. 5.10. - Profilele vitezei medii radiale de-a lungul axei de simetrie a camerei de postcombustie

Viteza radială, ca și cea în direcția anvergurii, atât în simularea numerică cât și în măsurătorile experimentale, este mică, deoarece curgerea principală în zona axei de simetrie este în principal axială.

Profilele de viteze medii în direcție radială

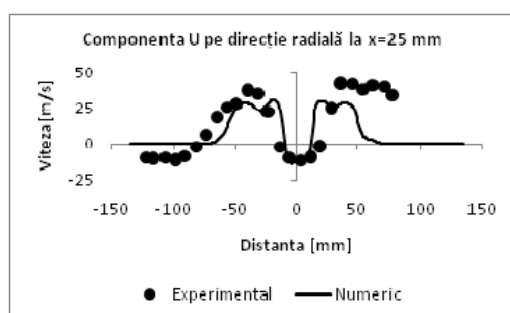


Fig. 5.12. - Profilele vitezei medii axiale în direcție radială, la 25 mm de la stabilizatorul de flacără

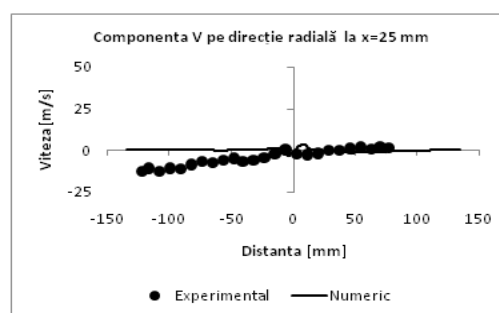


Fig. 5.13. - Profilele vitezei medii radiale în direcție radială, la 25 mm de la stabilizatorul de flacără

Profilele vitezei axiale și radiale sunt prezentate în secțiunea următoare la distanța de 25 mm de la marginea stabilizatorului de flacără (Fig. 5.12 - Fig. 5.13).

Profilele surprind bine regiunea de recirculare, unde valorile devin negative. În afara zonei de recirculare gazul este accelerat printr-o secțiune convergentă creată de suprafețele prismatice ale stabilizatorului de flacără, până la o valoare măsurată experimental de 40 m/s. Simularea numerică RANS surprinde bine zona de recirculare și gradientul vitezei din stratul de forfecare care îl delimitează, dar viteza gazului din curentul liber este de circa 30 m/s, prezentând și o ușoară subestimare a grosimii zonei de recirculare, care poate fi un efect al insuficienței rezoluției a rețelei de discretizare în regiune.

Teza de doctorat prezintă profilele radiale ale celor trei componente ale vitezei la poziții axiale de până la 200 mm, precum și profilele fluctuațiilor turbulente ale componentelor axiale și radiale ale vitezei.

5.2. Rezultate ale simulării numerice tridimensionale a sistemului de postcombustie pentru curgerea reactivă

Câmpurile de viteze medii

Această secțiune prezintă câmpul de viteze medii în curgerea turbulentă reactivă (Fig. 5.27 - 5.32) în geometria descrisă anterior.

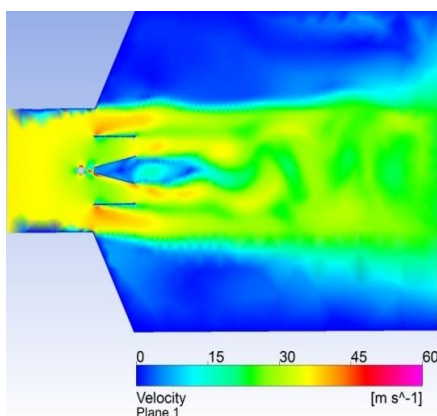


Fig. 5.27. - Câmpul numeric de viteză medie

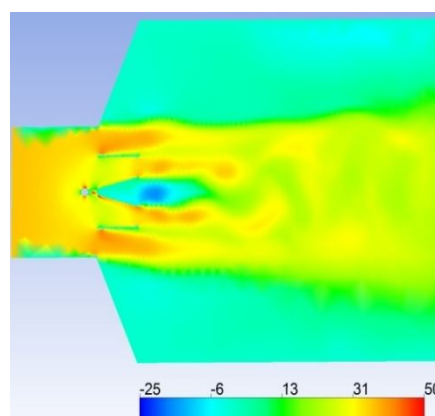


Fig. 5.29. - Câmpul numeric de viteză medie axială

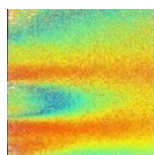


Fig. 5.28. - Câmpul experimental de viteză medie
(Aceeași scară de culoare ca în Fig. 5.27)

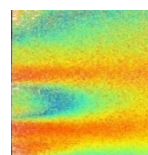


Fig. 5.30. - Câmpul experimental de viteză medie axială
(Aceeași scară de culoare ca în Fig. 5.29)

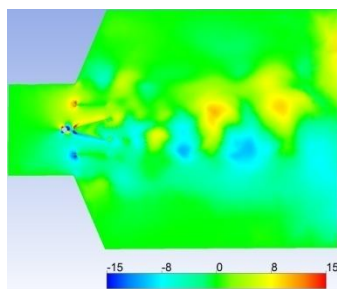


Fig. 5.31. - Câmpul numeric de viteza medie radială

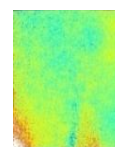


Fig. 5.32. - Câmpul experimental de viteza medie radială
(Aceași scara de culoare ca în Fig. 5.31)

Rezultatele numerice au fost obținute prin integrare numerică RANS, folosind modelul de turbulență RNG k- ϵ (Prezentat în Cap.2.2). Geometria simulării numerice reproduce geometria modelului experimental, pentru a putea compara rezultatele obținute numeric și experimental.

Profilele de viteze și temperaturi medii în direcție axială.

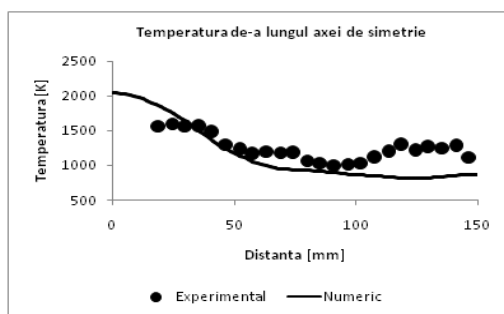


Fig. 5.33. - Profilul variației de temperatură de-a lungul axei de simetrie a camerei de postcombustie

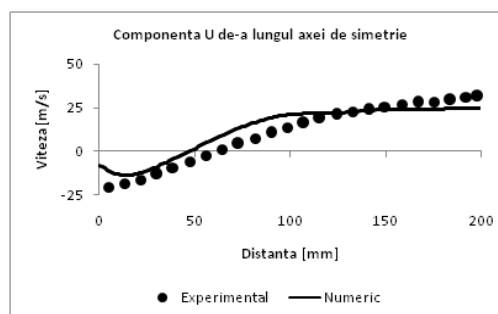


Fig. 5.34. - Profilele vitezei medii axiale de-a lungul axei de simetrie a camerei de postcombustie

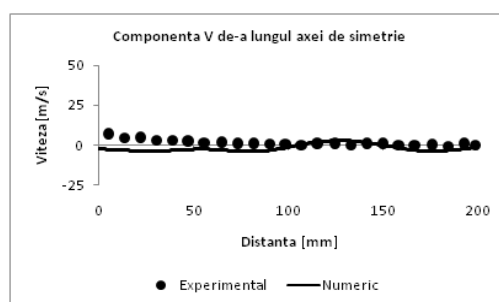


Fig. 5.35. - Profilul vitezei medii radiale de-a lungul axei de simetrie a camerei de postcombustie

Fig. 5.33 - 5.35 prezintă temperatura medie și componentele vitezei de-a lungul axei de simetrie a sistemului de postcombustie. Lungimea zonei de recirculare care este creată în curgere de prezența stabilizatorului de flacără este de aproximativ 90 mm, și valoarea maximă absolută a vitezei negative ajunge la aproximativ 25 m/s. În câmpul îndepărtat, viteza curentului liber este de aproximativ 35 m/s. Concordanța dintre simularea numerică și măsurătorile experimentale este rezonabilă pentru o simulare RANS.

Profilele de viteze și temperaturi medii în direcție radială.

Fig. 5.37 - 5.40 prezintă temperaturile medii și componentele vitezei de-a lungul la 25 mm de la bordul de fugă al stabilizatorului de flacără.

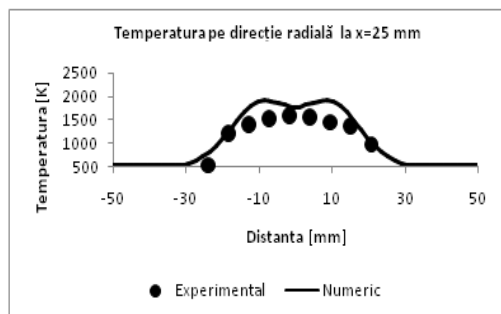


Fig. 5.37 - Profilul temperaturii de-a lungul liniei radiale la $x=25$ mm

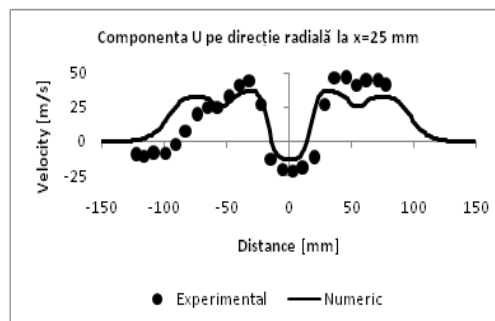


Fig. 5.38. - Profilul vitezei axiale de-a lungul liniei radiale la $x=25$ mm

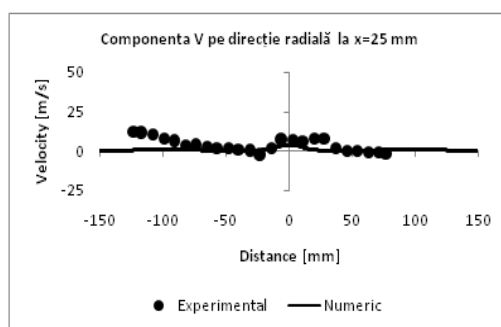


Fig. 5.39. - Profilul vitezei radiale de-a lungul liniei radiale la $x=25$ mm

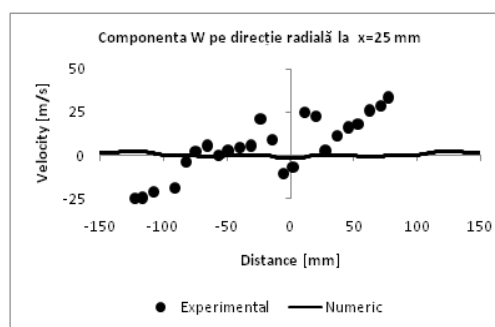


Fig. 5.40. - Profilul vitezei pe direcția anvergurii de-a lungul liniei radiale la $x=25$ mm

Principala discrepanță dintre datele reprezentând profilul temperaturii radiale obținute prin simularea numerică și cea experimentală este lungimea regiunii centrale de temperatură joasă a flăcării. Astfel, simularea numerică indică o zonă centrală de temperatură joasă de până la 100 mm în avalul stabilizatorului de flacără, în timp ce măsurătorile experimentale indică un vârf de temperatură la axă chiar și la distanța $x=25$ mm, efect cunoscut [46, 118] al simulărilor RANS, de a subevalua amestecarea turbulentă în cele două straturi de forfecare.

În direcția radială, regiunea vitezelor negative este de aproximativ 80 mm. Deficitul de viteză creat de către stabilizatorul de flacără scade către aval, cu un gradient axial dictat de către rata de expansiune volumică a eliberării căldurii. Concordanța dintre simularea numerică și datele experimentale este rezonabilă, conținând totuși o imprecizie a vitezei maxime în straturile de forfecare.

Teza de doctorat prezintă profilele radiale ale temperaturii și ale celor trei componente ale vitezei la poziții axiale de până la 200 mm, precum și profilele fluctuațiilor turbulente ale componentelor axiale și radiale ale vitezei.

CAPITOLUL 6 Concluzii

Lucrarea de față prezintă cercetările experimentale, numerice și teoretice desfășurate de către autor în vederea dezvoltării unui sistem de postcombustie utilizând combustibili gazoși menit să echipeze turbomotoarele stațiilor de cogenerare dezvoltate de INCD Turbomotoare (INCDT) COMOTI.

Cercetarea s-a valorificat prin 8 lucrări publicate și prezentarea unui brevet de invenție.

Prin raportare la stadiul actual al cercetărilor în domeniu și la realizările anterioare ale cercetătorilor, pe plan mondial, s-au identificat direcțiile în care este necesară aprofundarea eforturilor de cercetare, în corelație cu motivațiile și obiectivele prezentei teze de doctorat, prezentate în același Capitol introductiv.

Au fost efectuate studii ce au vizat dezvoltarea de soluții inovative în vederea creșterii eficienței și reducerii nivelului de emisii poluante la instalațiile de cogenerare. În cadrul acestor studii a rezultat un proiect complex, concretizat și printr-un dosar OSIM [4], și studii publicate [96, 97, 113, 114, 117, 119, 120, 121].

Acestea confirmă valabilitatea metodicilor experimentale și de calcul adoptate, rezultând că, în dezvoltarea unui sistem de postcombustie, se pot folosi codurile amintite mai sus, cu metoda de calcul folosită, reducându-se astfel costurile experimentale uzuale, fiind necesare doar experimente finale, pe sisteme optimizate prin calcul, cu eventuale mici ajustări.

CAPITOLUL 7 Contribuții originale personale

Cercetarea doctorală s-a materializat într-o serie de contribuții originale care au folosit cercetările teoretice, numerice și experimentale prezentate în capitolele anterioare. Aceste contribuții personale sunt sintetizate în cele de mai jos:

- Prin cercetarea doctorală și analiza stadiului actual din domeniul postcombustiei, al aplicațiilor acesteia în aviație și la turbomotoare industriale, precum și al mecanismelor de stabilizare a flăcării în sistemele de postcombustie, a rezultat și ideea de dezvoltare a unui sistem inovativ complex de postcombustie [4]. Având în vedere complexitatea sistemului [4], s-a ales pentru cercetare teoretico - experimentală, în prezenta teză, sistemul central de stabilizare, ce include, în sine, o noutate (auto-aspirația flăcării de aprindere);

- Dezvoltarea de subrutine pentru adaptarea codului numeric unidimensional al INCDT COMOTI la condițiile simulărilor numerice prezentate în această lucrare, atât pentru condiții reactive cât și pentru condiții nereactive. Subrutinele menționate se referă la condițiile la limită, condițiile inițiale, funcția de distribuție de probabilitate pentru poziția vârtejurilor turbulente și mecanismul de reacție chimică. Analiza ecuațiilor Navier – Stokes care guvernează curgerea vâscoasă, turbulentă și reactivă, precum și analiza modelelor numerice de turbulență și de combustie care pot fi utilizate pentru simularea numerică a acestor curgeri din punctul de vedere al completitudinii, al nivelului de descriere a fenomenului fizic modelat, al domeniului de validitate, ca și al necesarului de resurse de calcul.

- Proiectarea și optimizarea modelului experimental de sistem de postcombustie utilizat în cercetările experimentale efectuate în cadrul prezentei teze de doctorat;

- Alegerea instrumentației și calibrarea acesteia, utilizând tehnici de măsurare neintruzive:

- bazate pe iluminare LASER (sistemul PIV) ale câmpurilor de viteze instantanee, prin adaptarea tehnicii laser la cazul studiat (proiectarea sistemului de înșămânțare, asigurarea accesului optic, calibrarea instrumentației, dezvoltarea de programe de postprocesare și analiză), în trei cazuri distincte: în jetul liber al generatorului de gaz din amonte modelului experimental de sistem de postcombustie proiectat; în curgerea izotermă din avalul modelului experimental de sistem de postcombustie (fără aprinderea flăcării

secundare); în curgerea exotermă din avalul modelului experimental de sistem de postcombustie (cu aprinderea flăcării secundare);

- Efectuarea de măsurători experimentale de înaltă acuratețe, utilizând tehnici de măsurare neintruzive, bazate pe spectroscopie LASER (sistemul LIF) ale câmpurilor de concentrații instantanee ale radicalului liber OH în cazul curgerii exoterme din avalul modelului experimental de sistem de postcombustie sau a temperaturii (Termometria Rayleigh) prin adaptarea tehnicii laser la cazul studiat.

- Analiza poziției și stabilității frontului de flacără în modelul experimental de sistem de postcombustie aflat în funcționare pe baza câmpurilor de concentrații instantanee ale radicalului liber OH în corelație cu datele teoretice studiate anterior;

- Efectuarea de simulări numerice unidimensionale utilizând modele de combustie și amestecare de înaltă acuratețe ale jeturilor circulare turbulente izoterme și exoterme, folosind codul numeric unidimensional menționat anterior;

- Validarea și analiza rezultatelor simulărilor numerice în raport cu datele experimentale obținute în cadrul prezentei lucrări, precum și cu date experimentale existente în literatura de specialitate (numai în cazul flăcărilor în jet turbulent).

Este important de menționat, de asemenea, că cercetările originale prezentate în această lucrare cu fost sintetizate, într-un brevet de invenție cu titlul “Instalație de postcombustie, multietajată, în skyd turbomotor autoventilat”, depus la OSIM, și la care autorul este prim autor, partea centrală (stabilizatorul V central), fiind obiectivul principal al acestei teze.

CAPITOLUL 8 Direcții de dezvoltare viitoare

Din punct de vedere experimental, trebuie avută în vedere folosirea a unor camere ultrarapide care să permită o mai bună rezoluție temporală a măsurătorilor experimentale, cu efect direct asupra acurateții măsurătorilor fluctuațiilor turbulente. De asemenea, trebuie luate în considerare efectuarea măsurătorilor experimentale utilizând lentile optice de putere mai mare, care să permită simultan și creșterea rezoluției spațiale a măsurătorilor. Pentru optimizarea pe mai departe a sistemului de postcombustie, se are în vedere pe viitor efectuarea de măsurători experimentale pentru determinarea precisă a profilului vitezei la intrarea în sistemul de postcombustie, ceea ce ar putea îmbunătăți suplimentar calitatea rezultatelor numerice. O nouă simulare numerică ar trebui efectuată folosind noile date, care ar trebui să se potrivească mai bine cu datele experimentale. Măsurătorile vor trebui efectuate folosind PIV, prin realizarea accesului optic la admisia în sistemul de postcombustie. Din punct de vedere numeric, se poate continua dezvoltarea algoritmului numeric unidimensional folosit (al INCDT COMOTI). Se poate studia sensibilitatea rezultatelor numerice la diverșii parametri ce controlează funcționarea acestuia. Se poate observa că efectul presupunerii unui număr Lewis unitar și difuzia nediferențiată a diverselor specii chimice poate introduce erori relativ semnificative în simularea numerică, fiind necesară considerarea introducerii în algoritm a difuziei diferențiate. De asemenea, se poate căuta o soluție numerică pentru creșterea numărului de celule de calcul odată cu evoluția soluției către aval, pentru a se evita pierderea rezoluției DNS la distanțe mari.

Deasemeni, dacă resursele de calcul disponibile sunt semnificativ mai mari, trebuie luată în considerare și realizarea unei simulări numerice LES care, pe baza rezultatelor din literatura de specialitate [46, 118], ar trebui să furnizeze date mai exacte.

CAPITOLUL 9 Bibliografie

- [1] ANSYS. „Release 11.0 Documentation for ANSYS. Theory Reference for ANSYS and ANSYS Workbench. Chapter 7. Fluid Flow”, *Documentație ANSYS CFX*, December 2006
- [2] S.R. Turns. "An Introduction to Combustion. Concepts and Applications", *McGraw-Hill*, 2000
- [4] F.G. Florean, C. Sandu, I. Porumbel, A.C. Petcu, R. Carlanescu "Instalație de postcombustie, multietajata, in skyd turbomotor autoventilat", *Dosar OSIM nr.A/ 00210* din 11.03.2013
- [22] F.A. Williams. "Flame stabilization of premixed turbulent gases", *Applied Mechanics Surveys*, pag. 1157 - 1170, 1966
- [23] R.I. Ozawa. "Survey of basic data on flame stabilization and propagation for high speed combustion systems", *Technical Report AFAPL-TR-70-81*, The Marquardt Company, 1971
- [24] G.C. Williams, C.W. Shipman. "Some properties of rod stabilized flames of homogeneous gas mixtures", *Fourth Symposium (International) on Combustion*, pag. 733-742, 1953.
- [25] E.E. Zukoski, W.G. Marble. "Experiments concerning the mechanism of flame blowoff from bluff bodies", *Proceedings of the Gas Dynamic Symposium on Aerothermochemistry*, pag. 205-210, 1955.
- [26] E.E. Zukoski, W.G. Marble. "Experiments concerning the mechanism of flame blow off from bluff bodies", *Combustion Researches and Reviews*, pag. 167-180, 1956.
- [27] J.P. Longwell, J.E. Cheveney, W.W. Clark, E.E. Frost. "Flame stabilization by baffes in a high velocity gas stream", *Third Symposium (International) on Combustion*, pag. 40-44, 1949.
- [28] A.A. Westenberg, W.G. Berl, J.L. Rice. "Studies of flow and mixing in the recirculation zone of baffle-type flameholders", *Proceedings of the Gas Dynamic Symposium on Aerothermochemistry*, pag. 211-219, 1956.
- [46] I. Porumbel, „LES of bluff body stabilized premixed and partially premixed combustion”, *VDM Verlag Dr. Muller*, Saarbrucken, Germania, 2007

- [52] S.B. Pope. "Turbulent Flows", *Cambridge University Press*, Cambridge, U.K., 2000
- [58] N. Peters. „Turbulent Combustion”, *Cambridge University Press*, Cambridge, Marea Britanie, 2000.
- [96] F.G. Florean, J.A. Popescu, I. Porumbel, C. Carlanescu, G. Dumitrascu. "Experimental measurements and numerical simulations in isothermal turbulent flows", *GT 2102 - 69377. ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, Volume 1: Aircraft Engine; Ceramics; Coal, Biomass and Alternative Fuels; Controls, Diagnostics and Instrumentation, Copenhagen, Denmark, June 11 - June 15, 2012, ISBN: 978-0-7918-4467-0
- [97] I. Porumbel, F.G. Florean, S. Ionescu, C.E. Hritcu, C. Sandu. "Numerical simulation and experimental measurements in a gas turbine turbulent exhaust jet", *3rd International Conference on Experiments / Process / System Modeling / Simulation & Optimization*, 3rd IC-EpsMsO, Athens, 8-11 July, 2009
- [98] S. Menon, J.Wu. "Effects of micro- and macroscale turbulent mixing on chemical processes in engine exhaust plumes", *Journal of Applied Meteorology*, vol. 37, pag. 639 - 653, 1998
- [100] I. Porumbel, S. Menon. "Prediction of soot formation in a turbulent diffusion jet flame using the Linear-Eddy model", *AIAA – 2003 - 0312*, 2003
- [101] S Menon, W.H. Calhoon, G. Goldin, A.R. Kerstein. "Effects of molecular transport on turbulence chemistry interactions in a Hydrogen – Argon – air jet diffusion flame", *Twenty – Fifth Symposium (International) on Combustion*, pag. 1125-1131, 1994
- [102] L.D. Landau, E.M. Lifshitz. "Turbulece Fluid Mechanics", *Pergamon Press*, New York, U.S.A., 1959
- [104] R.S. Barlow, J.H. Frank. "Effects of Turbulence on Species Mass Fractions in Methane/Air Jet Flames", *Proceedings of the Combustion Institute*, 27, pp. 1087-1095, 1998.
- [105] ***. "Shaft Power Gas Turbine Engine , Model No. GTP30-67", *Tehnic Manual, Field Maintenance Instruction*, Published Under Authority of The Secretary Of The Air Force, 1 November 1966, Change 2 – 15, October 1974
- [106] M Grumăzescu., A Stan, N Wegner, V. Marinescu. "Combaterea zgomotului și vibrațiilor în tehnică", *Ed. Tehnică*, București, 1964
- [107] LaVision GmbH. "Product Manual for PIV", *LaVision GmbH*, Anna-Vandenhoeck-Ring 19, D-37081 Göttingen, January 13, 2009

[108] LaVision GmbH. "Product-Manual for DaVis 7.2, LIF in gaseous fluids", *LaVision GmbH*, Anna-Vandenhoeck-Ring 19, D-37081 Göttingen, January 13, 2009

[109] C.F. Fredette. "Quantitative hydroxyl (OH) concentration calibration by use of a flat flame burner, thermocouple and planar laser induced fluorescence (PLIF) system", *M. Sc. Thesis*, Department of Mechanical and Industrial Engineering, Northeastern University, January 01, 2009

[110] R. Andrews. "Measurement of Hydroxyl (OH) Concentration of Transient Premixed Methane-Air flames by Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF) Method", *M. Sc. Thesis*, Northeastern University, Boston, MA, 2008.

[111] LaVision GmbH, Sirah Technical Staff. "Sirah Pulsed Dye Laser Service Manual", *LaVision GmbH*, Anna-Vandenhoeck-Ring 19, D-37081 Göttingen, Produced by LaVision GmbH, Göttingen 2007.

[112] LaVision GmbH. "Product-Manual for DaVis 7.2, Rayleigh Thermometry", *LaVision GmbH*, Anna-Vandenhoeck-Ring 19, D-37081 Göttingen, January 13, 2009

[113] F.G. Florean, C. Sandu, I. Porumbel. "Experimental measurements in reactive and non-reactive turbulent flows". *AIAA - 2012 - 4271, 48th AIAA / ASME / SAE / ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit and 10th International Energy Conversion Engineering Conference*, Atlanta, Georgia, S.U.A., 2012,

[114] I. Porumbel, C. Carlanescu, F.G. Florean, C.E. Hritcu. "LES algorithm for turbulent reactive flows simulation", *3rd Applied Computing Conference*, Timișoara, Romania, 2010

[117] B.G. Gherman, F.G. Florean, C. Cărlănescu, I. Porumbel. "On the influence of the combustion model on the result of turbulent flames numerical simulations", *GT 2012-69255, ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition*, Volume 2: Combustion, Fuels and Emissions, Parts A and B, Copenhagen, Denmark, June 11 - 15, 2012, ISBN: 978-0-7918-4468-7

[118] I. Porumbel, S. Menon. "Large Eddy Simulation of bluff body stabilized premixed flame", *AIAA-2006-0152, 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada, S.U.A., 9 - 12 January 2006,

[119] F.G. Florean, I. Porumbel, G. Alexandru, G. Dumitrascu. "Numerical simulation and experimental measurements in a gas turbine turbulent exhaust jet", *The 5th international conference on advanced concepts in mechanical engineering*, Iasi, Romania, June 14-15, 2012

[120] F.G. Florean, C.E. Hritcu, C. Sandu, C. Carlanescu, I. Porumbel. "A Linear Eddy Model simulation of a gas turbine round turbulent exhaust jet validated by experimental measurements", *METIME Conference*, Galati, 2009

[121] F.G. Florean, C. Sandu, C.E. Hritcu, G. Dumitrascu. "PLIF OH measurements of turbulent bluff body stabilized flame", *Detailed Chemical Models For Cleaner Combustion, 3rd General Meeting*, Sofia, Bulgaria, September 5-7, 2012

[124] <http://cost.ensic.univ-lorraine.fr/cost/>

[125] <http://www.comoti.ro/ro/Laborator%20de%20Combustie.htm>

[126] <http://www.sandia.gov/TNF/DataArch/FlameD.html>