

Universitatea Ştefan cel Mare Suceava

Facultatea de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management

TEZĂ DE DOCTORAT

DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

CERCETĂRI PRIVIND ATOMIZAREA COMBUSTIBILULUI LA SISTEMELE DE INJECȚIE MULTIPUNCT

REZUMAT

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC: Prof.univ.dr.ing. Ioan MIHAI

DOCTORAND:

Ing. Marius Constantin BENIUGA

SUCEAVA, 2017













Universitates Itefan cel Mare Successa

Investește în oameni !

Proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Axa prioritară nr. 1 'Educația și formarea în sprijinul creșterii economice și dezvoltării societății bazate pe cunoaștere"

Domeniul major de intervenție 1.5 "Programe doctorale și post-doctorale în sprijinul cercetării"

Titlul proiectului: "SOCERT. Societatea cunoașterii, dinamism prin cercetare" Număr de identificare contract: POSDRU/159/1.5/S/132406 Beneficiar: Universitatea "Ștefan cel Mare" din Suceava Parteneri: Institutul de Economie Națională-P1, Universitatea din Oradea-P2 Lucrare susținută de "*Centrul integrat de cercetare, dezvoltare și inovare pentru Materiale Avansate, Nanotehnologii si Sisteme Distribuite de fabricație și control*", dezvoltat în cadrul Contractului nr. 671/09.04.2015, Programul Operațional Sectorial Creșterea Competitivității Economice, co-finanțat din Fondul European de Dezvoltare Regională, pentru infrastructura de cercetare pusă la dispoziție și utilizată în cadrul tezei.

Cuprins:

1. STADIUL ACTUAL PRIVIND ATOMIZAREA COMBUSTIBILULUI LA
SISTEMELE DE INJECȚIE MULTIPUNCT 1
1.1. Introduce re
1.2. Clasificarea proceselor de atomizare
1.3. Particularitățile formării amestecului carburant la sistemele de injecție
multipunct
1.4. Dinamica jetului de lichid, a anvelopei si picăturilor la injectia
combustibilului
1.4.1. Instabilitatea capilară a jeturilor de lichid libere neînecate 6
142 Foustii de bază privind dinamica istului
1.4.2 Instabilitates espileră e unui jet de liebid nevêsees
1.4.5. Instabilitatea capitara a unui jet de licitid nevascos
1.5. Procesul de atomizare. Introducere.
1.6. Modele de atomizare
1.7. Coeficientul aerodinamic al picăturilor de lichid, simularea dinamicii
acestora
1.8. Concluzii. Direcții de cercetare
2. CONTRIBUTII PRIVIND ATOMIZAREA JETULUI DE LICHID CARE
SE DEPLASEAZĂ ÎNTR-UN MEDIU GAZOS
2.1. Introduce re
2.2. Atomizarea jetului de lichid la sistemele de injecție multipunct
2.2.1. Modificarea coeficientului de frecare a picăturilor cu mediul gazos funcție
de numărul Reynolds
2.2.2. Determinarea coeficientului aerodinamic al nicăturilor funcție de raportul
dintre vâscozitatea combustibilului și cea a aerului 28
23 Contribuții privind studiul factorilor care influentează atomizarea ietului
de lichid într un mediu gezos
2.2.1 Determinares nerturbatillar de suprefeté a jetului de lisbid la stermizeres
2.5.1. Determinarea perturbaçmor de supraraça a jetulur de ficilid la atomizarea
acesuma
2.3.2. Variația diametrului mediu Sauter (SNID) al picaturilor de combustibil
funcție de viteza aerului
3 TRANSFERIL DE CALDURA AL PICATURILOR DE COMBUSTIRIL
3. TRANSFERE
CARE SE DEPLASEAZĂ ÎNTR-UN MEDIU GAZOS
CARE SE DEPLASEAZĂ ÎNTR-UN MEDIU GAZOS 33 3.1. Transferul de căldură pentru picăturile de lichid injectate într-un mediu gazos fără conside ra rea difuziei termice 33 3.2. Transferul de căldură al picăturilor de combustibil injectate într-un mediu gazos considerând fenomenul de difuzie termică 36 3.2.1. Determinarea coeficientului de transfer difuziv 36 3.2.2. Calculul coeficientului de difuzie termică în cazul injecției combustibilului funcție de variația temperaturii aerului aspirat în motor 36 3.3. Modificarea diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului pe suprafețe 38 3.3.1. Calculul diametrului picăturilor la vaporizarea combustibilului fără considerane difuziei termice 38
CARE SE DEPLASEAZĂ ÎNTR-UN MEDIU GAZOS 33 3.1. Transferul de căldură pentru picăturile de lichid injectate într-un mediu gazos fără considerarea difuziei termice 33 3.2. Transferul de căldură al picăturilor de combustibil injectate într-un mediu gazos considerând fenomenul de difuzie termică 36 3.2.1. Determinarea coeficientului de transfer difuziv 36 3.2.2. Calculul coeficientului de difuzie termică în cazul injecției combustibilului funcție de variația temperaturii aerului aspirat în motor 36 3.3. Modificarea diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului pe suprafețe 38 3.3.1. Calculul diametrului picăturilor la vaporizarea combustibilului fără considerarea difuziei termice 38
CARE SE DEPLASEAZĂ ÎNTR-UN MEDIU GAZOS 33 3.1. Transferul de căldură pentru picăturile de lichid injectate într-un mediu gazos fără conside ra rea difuziei termice 33 3.2. Transferul de căldură al picăturilor de combustibil injectate într-un mediu gazos considerând fenomenul de difuzie termică 36 3.2.1. Determinarea coeficientului de transfer difuziv 36 3.2.2. Calculul coeficientului de difuzie termică în cazul injecției combustibilului funcție de variația temperaturii aerului aspirat în motor 36 3.3. Modificarea diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului pe suprafețe 38 3.3.1. Calculul diametrului picăturilor la vaporizarea combustibilului fără considerarea difuziei termice 38 3.3.2. Calculul diametrului picăturilor la vaporizarea combustibilului fără 38 3.3.2. Calculul diametrului picăturilor la vaporizarea combustibilului fără 38 3.3.2. Calculul diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării 38 3.3.2. Calculul diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării 38
CARE SE DEPLASEAZĂ ÎNTR-UN MEDIU GAZOS 33 3.1. Transferul de căldură pentru picăturile de lichid injectate într-un mediu gazos fără conside rarea difuziei termice 33 3.2. Transferul de căldură al picăturilor de combustibil injectate într-un mediu gazos considerând fenomenul de difuzie termică 36 3.2.1. Determinarea coeficientului de transfer difuziv 36 3.2.2. Calculul coeficientului de difuzie termică în cazul injecției combustibilului funcție de variația temperaturii aerului aspirat în motor 36 3.3. Modificarea diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului fară considerarea difuziei termice 38 3.3.1. Calculul diametrului picăturilor la vaporizarea combustibilului fără considerarea difuziei termice 38 3.3.2. Calculul diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului fără 38 3.3.2. Calculul diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului fără 38 3.3.2. Calculul diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului fără 38 3.3.2. Calculul diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării 38 3.3.2. Calculul diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării 38 3.3.2. Calcului diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării 38 3.3.4. Calcului diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării 40
CARE SE DEPLASEAZĂ ÎNTR-UN MEDIU GAZOS 33 3.1. Transferul de căldură pentru picăturile de lichid injectate într-un mediu gazos fără conside rarea difuziei termice 33 3.2. Transferul de căldură al picăturilor de combustibil injectate într-un mediu gazos considerând fenomenul de difuzie termică 36 3.2.1. Determinarea coeficientului de transfer difuziv 36 3.2.2. Calculul coeficientului de difuzie termică în cazul injecției combustibilului funcție de variația temperaturii aerului aspirat în motor 36 3.3. Modificarea diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului fără considerarea difuziei termice 38 3.3.1. Calculul diametrului picăturilor la vaporizarea combustibilului fără considerarea difuziei termice 38 3.3.2. Calculul diametrului picăturilor la vaporizarea combustibilului fără considerarea difuziei termice 38 3.3.3.1. Calculul diametrului picăturilor la vaporizarea combustibilului fără considerarea difuziei termice 38 3.3.2. Calculul diametrului picăturilor la lichid în timpul vaporizării combustibilului conside rând fenomenul de difuzie termică 40 3.3.3.1. Modificarea diametrului picăturilor în timp la diferite presiuni ale 40

3.4. Modelarea în ANSYS a procesului de atomizare a jetului de combustibil 44				
3.4.1. Modelarea în ANSYS a evoluției în timp a vitezei jetului de picături de				
combustibil pulve rizate într-un me diu gazos				
3.4.2. Determinarea formei jetului de combustibil prin simulare în ANSYS 45				
4. CONCEPEREA ȘI REALIZAREA STANDULUI EXPERIMENTAL				
DESTINAT STUDIULUI ATOMIZĂRII COMBUSTIBILULUI				
4.1. Conceperea standului experimental				
4.2. Descrierea standului experimental pentru studiul atomizării				
combustibilului				
4.3. Descrierea aparaturii de cercetare				
4.3.1. Profilo metrul cu laser μScan				
4.3.2. Echipamente de captare a imaginilor jetului de combustibil atomizat 49				
4.3.3. Camera pentru termoviziune cu IR				
4.3.4. Kitul KDJE-K 100 BOS CH Jetronic				
4.4. Contribuții aduse la comanda și controlul injectoarelor sistemelor de				
injecție multipunct				
4.5. Metodica alegerii injectoarelor în vederea efectuării determinărilor				
experimentale				
5. REZULTATE EXPERIMENTALE OBȚINUTE LA ATOMIZAREA				
JETULUI DE COMBUSTIBIL				
5.1. Metodologia de testare a injectoarelor				
5.2. Stabilirea gradului de uzură a injectoarelor folosind metoda				
52 Matalia si seconda fa tažaži dataminžaila secondala 55				
5.5. Mietodica și scopul efectuarii determinarilor experimentale				
5.4. Analiza in Matiab a imaginii jetului de combustibil atomizat				
5.4.1. Analiza formet jetului la injectorul cu uzuri ridicate testat la presiune				
Scazula				
5.4.2. Analiza parametrilor jetului de combustibil atomizat obținuți cu soit-ul Motlob				
$\mathcal{L} = \mathcal{L} = $				
0. CORECȚIA PARAMEIRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCI FUNCȚIE DE LIZURA INTECTOARELOR				
6. CORECȚIA PARAMEIRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCI FUNCȚIE DE UZURA INJECTOARELOR				
b. CORECȚIA PARAMETRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCI FUNCȚIE DE UZURA INJECTOARELOR				
6. CORECȚIA PARAMETRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCI FUNCȚIE DE UZURA INJECTOARELOR 63 6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției sistemelor de injecție 63 6.2. Rezultatele corecției parametrilor în Matlab Simulink funcție de uzura				
6. CORECȚIA PARAMETRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCI FUNCȚIE DE UZURA INJECTOARELOR 63 6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției sistemelor de injecție 63 6.2. Rezultatele corecției parametrilor în Matlab Simulink funcție de uzura 66				
6. CORECȚIA PARAMETRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCT FUNCȚIE DE UZURA INJECTOARELOR 63 6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției sistemelor de injecție 63 6.2. Rezultatele corecției parametrilor în Matlab Simulink funcție de uzura injectoarelor 66 7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUTII SI DIRECTII DE CERCETARE 72				
6. CORECȚIA PARAMETRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCI FUNCȚIE DE UZURA INJECTOARELOR 63 6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției 63 6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției 63 6.2. Rezultatele corecției parametrilor în Matlab Simulink funcție de uzura 66 7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII DE CERCETARE 72 71. Concluzii și contribuții aduse în plan teoretic și experimental				
6. CORECȚIA PARAMETRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCT FUNCȚIE DE UZURA INJECTOARELOR 63 6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției 63 6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției 63 6.2. Rezultatele corecției parametrilor în Matlab Simulink funcție de uzura 63 7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII DE CERCETARE 72 71. Concluzii și contribuții aduse în plan teoretic și experimental				
6. CORECȚIA PARAMETRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCT FUNCȚIE DE UZURA INJECTOARELOR 63 6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției 63 6.2. Rezultatele corecției parametrilor în Matlab Simulink funcție de uzura 63 6.2. Rezultatele corecției parametrilor în Matlab Simulink funcție de uzura 66 7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII DE CERCETARE 72 71. 7.1. Concluzii și contribuții aduse în plan teoretic și experimental				
6. CORECȚIA PARAMETRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCT FUNCȚIE DE UZURA INJECTOARELOR 63 6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției 63 sistemelor de injecție 63 6.2. Rezultatele corecției parametrilor în Matlab Simulink funcție de uzura 66 7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII DE CERCETARE 72 71. Concluzii și contribuții aduse în plan teoretic și experimental 72 7.2. Impactul cercetărilor asupra sistemelor de injecție multipunct 79 7.3. Direcții de cercetare 80 Bibliografie 81				
6. CORECȚIA PARAMETRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCT FUNCȚIE DE UZURA INJECTOARELOR 63 6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției 63 6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției 63 6.2. Rezultatele corecției parametrilor în Matlab Simulink funcție de uzura 66 7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII DE CERCETARE 72 71. Concluzii și contribuții aduse în plan teoretic și experimental				

Obiectivele și structura tezei

În ultimii ani de exploatare a autovehiculelor dotate cu motoare cu ardere internă se caută soluții cât mai eficiente de reducere a noxelor. Întrucât soluția pornește mai întotdeauna de la cauză se constată cu ușurință că prin arderea combustibilului motorul generează aproape în totalitate noxele eliberate în mediul ambiant. Cercetările destinate reducerii noxelor s-au axat în ultimii ani pe studiul și optimizarea procesului de ardere și pe utilizarea unor metode de reducere catalitică aplicate gazelor de ardere. Întrucât în prezent mai toate autovehiculele fabricate sunt dotate cu sisteme de injecție multipunct s-a gândit că pentru acestea este oportun să se efectueze cercetări asupra procesului de atomizare a combustibilului în dependență de uzura injectoarelor. Trecerea unui fluid din stare lichidă în stare gazoasă într-un timp de ordinul milisecundelor printr-un proces de atomizare urmat de o vaporizare rapidă impune anumite condiții constructive și funcționale. În tot acest timp are loc și o modificarea a regimului de utilizare.

Atomizarea este un proces complex, care implică destrămarea de natură fizică a jetului de combustibil și coalescența microparticulelor lichide. Atomizarea apare și datorită existenței unor interferențe de tip turbulent între anvelopa de picături și mediul gazos din galeria de admisie cât și procesului de vaporizare parțială sau totală.

Până în prezent au fost dezvoltate diverse modele care descriu procesul de atomizare în baza teoriei instabilității jetului de lichid pulverizat. O explicație a procesului de atomizare a combustibilului este pusă pe seama fortării trecerii lichidului prin unul sau mai multe orificii ale duzei injectorului. Urmare a trecerii combustibilului prin duze se formează un jet de picături atomizat a cărui formă finală depinde de presiunea aplicată care la rândul său este astfel reglată încât să satisfacă cerințele sistemului de injecție multipunct. Teoria instabilității jeturilor de lichid este folosită ca o primă estimare a caracteristicilor fizice ale picăturilor care pot fi formate prin aceste duze. În unele variante de pulverizare, se formează pentru o foarte scurtă perioadă de timp un strat subțire de lichid (un film, o peliculă) care precede fenomenul de atomizare. Pentru această etapă a procesului de atomizare este folosită teoria instabilității filmului de combustibil pulverizat. Dacă se consideră un jet de lichid liber care se deplasează într-un mediu gazos în ipoteza unor perturbatii exterioare mici se consideră două tipuri de instabilități - liniare și neliniare. Folosind teoria instabilității de tip liniar se estimează dimensiunile de bază ale picăturilor de combustibil în curs de formare odată cu debutul dispersiei picăturilor. Întrucât procesul de formare a anvelopei este complex se va lua în considerare aparitia picăturilor de tip satelit precum si alte efecte, cum ar fi termocapilaritatea sau turbionarea. Picăturile atomizate de combustibil interacționează cu mediul gazos înconjurător, fiind necesar să se ia în considerare inclusiv oscilațiile, deformările și destrămările acestora. Jetul de lichid atomizat format dintr-o multitudine de picături care se deplasează în interiorul unui mediu gazos, este supus și fenomenului de ciocnire între picături sau cu pereții sistemului.

Pornind de la cele afirmate se consideră necesară aprofundarea studiului procesului de atomizare a jetului de combustibil dezvoltat în sistemele de injecție multipunct. Pentru a atinge acest deziderat este necesar să se efectueze cercetări care urmăresc atingerea obiectivelor:

• Cunoașterea detaliată a stadiului actual de dezvoltare a sistemelor de injecție multipunct a benzinei și a modelelor care prezic modul de atomizare a combustibilului. În această etapă se va realiza o clasificare a sistemelor de injecție urmată de o prezentare în detaliu a procesului de atomizare. Se va studia principiul de asigurare a dozajului de combustibil funcție de sarcină, turație, temperatura mediului exterior etc. și se vor dezbate particularitățile constructive ale *sistemelor de injecție multipunct cu injecție indirectă* a benzinei. Se va analiza circuitul de alimentare cu combustibil la sistemul de injecție multipunct al motoarelor cu aprindere prin scânteie (MAS). Se va face o analiză a elementelor constructive ale sistemului de injecție multipunct care asigură atomizarea combustibilului. Este necesar să se studieze dinamica jetului de lichid și modelele de pulverizare dezvoltate până în stadiul actual.

- Pentru analiza parametrilor procesului de atomizare a picăturilor de combustibil la sistemele de injecție multipunct este necesar să se dezvolte modele matematice sau să se utilizeze cele deja existente. Se urmărește cu precădere comportarea picăturilor de combustibil care se deplasează într-un mediu gazos străbătut de un gradient de temperatură. Se va studia modul în care se diminuează diametrul picăturilor din jetul atomizat funcție de:
 - diametrul inițial al picăturii,
 - temperatura mediului în care se deplasează,
 - viteza de deplasare,
 - spațiul parcurs.

Este necesar să se efectueze calcule analitice care să permită determinarea deformării sau destrămării picăturilor de lichid, dinamicii picăturilor de lichid, rezistenței și coeficienților aerodinamici funcție de raportul dintre vâscozitatea picăturii și vâscozitatea fluxului de aer. Se va determina numărul Reynolds luând în considerare modificarea coeficientului de frecare funcție de forma picăturilor de combustibil.

O atenție deosebită va fi acordată aducerii unor contribuții privind factorii care influentează atomizarea jetului de lichid care se deplasează într-un mediu gazos. În acest sens va fi analizat efectul perturbațiilor de suprafață asupra jetului de lichid la atomizarea acestuia. De asemenea este necesar să se determine variatia lungimii de undă a perturbațiilor suprafeței jetului de lichid funcție de viteza aerului. Modelările efectuate într-un mediu de programare permit să se determine variatia Diametrului Mediu Sauter (SMD) inclusiv a diametrelor intermediare pe parcursul vaporizării picăturilor de combustibil funcție de viteza aerului și a lichidului pulverizat. Pentru efectuarea acestor modelări se pot utiliza medii de programare precum Matlab, fiind posibil să se traseze grafice pentru o serie de parametri. Rezultatele obținute pot fi comparate cu cele obținute prin calcule analitice. Întrucât deplasarea picăturilor de combustibil are loc în colectorul de admisie până în poarta supapei și chiar după aceasta, este necesar să se ia în considerare transferul de căldură. Prin ipoteză se consideră că picăturile de lichid sunt injectate într-un mediu gazos izoterm sau neizoterm în regim tranzitoriu sau staționar. Se consideră că este necesar ca transferul de căldură ce caracterizează vaporizarea picăturilor de combustibil injectate într-un mediu gazos să ia în considerare fenomenul de difuzie termică. Pentru atomizarea picăturilor de combustibil este necesar să se determine prin calcule coeficientul de difuzie termică și vitezele momentane de vaporizare a picăturilor de lichid injectate într-un proces cu evoluție difuzivă funcție de variația temperaturii aerului aspirat în motor. Se va face o analiză a modului în care variază coeficientul de difuzie termică în funcție de temperatura aerului absorbit pentru diferite valori ale presiunii aerului din colectorul de admisie.

Pentru validarea rezultatelor analitice se va apela la modelarea procesului de atomizare a jetului de combustibil în programul ANSYS. Rezultatele obținute prin simularea în ANSYS permit determinarea vitezei momentane a jetului de aer și a picăturilor la diferite momente de timp ale injecției. Cu ajutorul imaginilor obținute prin simularea din ANSYS se va putea urmări forma jetului de combustibil atomizat și se va putea analiza diferențele de viteză a picăturilor de combustibil față de viteza aerului aspirat în motor. Pentru analiza modului în care decurge atomizarea picăturilor de combustibil într-un mediu gazos este necesar să se conceapă și realizeze un standul experimental. Pentru a controla durata injecției și periodicitatea acesteia este necesar să se realizeze un modul electronic de comandă și control. Echipamentul de injecție multipunct trebuie să fie dotat cu pompă de alimentare, regulator de presiune, rampă comună, sistem de comandă și control și echipament specializat de citire a presiunii de injecție. S-a optat pentru un sistem cu patru injectoare de combustibil. În plus este necesar ca injecția să poată fi efectuată în galeria de admisie a unui motor dotat cu injecție multipunct. Cilindrii motorului trebuie să permită cu ajutorul unor ferestre de vizitare captarea imaginilor anvelopei jetului de combustibil pulverizat. Standul trebuie să asigure posibilitatea iluminării corespunzătoare și o corelare între debutul și durata injecției și captarea imaginilor combustibilului atomizat.

Pentru achiziția unor imagini de calitate sunt necesare echipamente și sisteme de iluminare profesionale de fotografiere 4K cât și softuri de prelucrare a imaginilor. Aparatura de cercetare utilizată urmărește ca prin profilometrie laser (profilometrul laser μ Scan fără contact, produs de *NanoFocus*) să se cerceteze suprafețele unor elemente constructive ale injectoarelor la nivel microscopic. Pentru studiul suprafețelor elementelor constructive ale injectoarelor, se va folosi senzorul confocal *CF13*.

Întrucât durata procesului de atomizare a combustibilului este variabilă având o durată maximă de ordinul milisecundelor este necesar să se efectueze filmări rapide. Pentru aceasta se va utiliza camera de filmare la mare viteză Fastec HISPEC 5 și camera de filmat TROUBLESHOOTER model TSHRCS, ambele produse de Fastec Imaging Corporation. Ambele camere de filmat la mare viteză fac parte din dotarea Facultății de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management din cadrul Universității Ștefan cel Mare din Suceava. Dispozitivele menționate permit stocarea și apoi cu ajutorul softurilor din dotare vizualizarea cadru cu cadru a imaginilor. Este necesară *marcarea* anumitor momente din timpul injecției multipunct, lucru posibil cu sistemele de trigerare ale echipamentelor din dotare. Pentru verificarea temperaturii de lucru se vor utiliza camerele cu termoviziune prin radiații infraroșii FLIR X6540SC dotată cu răcire și FLIR TG165.

Va fi conceput și realizat un stand experimental care să permită controlul și comanda injectoarelor unui sistem de injecție multipunct și efectuarea de măsurători. Se va stabili metodica efectuării determinărilor experimentale și modul în care se aleg injectoarele în vederea obținerii unor rezultate concludente și coerente. Prin profilometrie laser se va stabili gradul de uzură a injectoarelor, alegându-se apoi din eșantionul studiat, cele care vor fi supuse determinărilor experimentale pentru studiul atomizării jetului de combustibil.

Se vor obține seturi de imagini ale jetului de combustibil atomizat funcție de durata injecției și de periodicitatea ciclică folosind filmări la mare viteză.

După sortarea imaginilor din filmele de mare viteză cu softuri specializate se va analiza jetul de combustibil atomizat în Matlab. Pentru aceasta se va folosi un soft de recunoaștere a imaginilor la care se vor aduce contribuții pentru adaptarea algoritmului la cazul injecției multipunct. Se urmărește ca analiza imaginilor în Matlab a jeturilor de combustibil atomizat să permită vizualizare evoluției parametrilor picăturilor de combustibil odată cu:

- modificarea duratei de injecție,
- schimbarea perioadei ciclicității injecției,
- uzura injectoarelor,
- modificarea presiunii de injecție,
- temperatura colectorului de admisie.

După obținerea tuturor rezultatelor vor fi aduse contribuții care să stipuleze în funcție de caracteristicile procesului de atomizare, durata injecției, periodicitatea ciclică, temperatură, presiune etc. modul în care se poate acționa astfel încât calculatorul de injecție să asigure corelările necesare pentru a obține o injecție calitativă și cantitativă.

În baza celor de mai sus se poate considera că cel puțin următoarele obiective sunt necesar a se atinge:

- ✓ Să se facă o analiză privind stadiul actual al controlului sistemelor de injecție multipunct şi să se stabilească dacă se face o compensare a uzurii injectoarelor. Se va analiza modul cum decurge atomizarea jetului de benzină pulverizat cu sistemele de injecție multipunct.
- ✓ Vor fi aduse contribuții în dezvoltarea unor modele matematice de calcul care să permită determinarea timpului de vaporizare şi analiza evoluției diametrului picăturilor de combustibil funcție de temperatura mediului gazos în care evoluează, diametrul inițial al picăturii, drumul parcurs, viteza de deplasare cu sau fără difuziune termică.
- ✓ Va fi conceput și realizat un modul electronic de comandă și control a duratei injecției și a periodicității ciclice pentru sistemele de injecție multipunct. Se va realizarea un stand care să permită injecția multipunct la minim patru injectoare dotat cu pompă de alimentare, regulator de presiune, rampă comună, sistem de monitorizare a temperaturii și presiunii, modul electronic de comandă și control, sistem de captare a imaginilor, cilindri cu ferestre de vizitare. Vor fi efectuate determinări experimentale după o schemă prestabilită.
- ✓ Se va implementa în Matlab Simulink un algoritm de recunoaștere și prelucrare a imaginilor adaptat sistemelor de injecție multipunct. Cu ajutorul softului Matlab Simulink se vor analiza imaginile captate și se vor compara cu cele obținute prin cercetări similare.
- ✓ Se vor releva clar modalitățile prin care se poate acționa asupra procesului de atomizare astfel încât acesta să fie calitativ şi corelat cantitativ cu cerințele sistemului de injecție multipunct pe toată durata de exploatare.

Această lucrare este structurată în șapte capitole, urmate de bibliografia studiată, diseminarea rezultatelor și de anexe.

Primul capitol, intitulat "Stadiul actual privind atomizarea combustibilului la sistemele de injecție multipunct", prezintă în prima parte o clasificare a sistemelor de injecție, apoi o prezentare generală a procesului de atomizare. În acest capitol sunt punctate particularitățile sistemelor de injecție multipunct pentru cazul injecției indirecte a benzinei. În capitol sunt prezentate și câteva aspecte privind dinamica jetului de lichid și aspectele specifice care caracterizează procesul de atomizare. Capitolul se încheie cu prezentarea unor modele de pulverizare, urmate de concluzii și direcții de cercetare.

În capitolul al doilea, numit "Contribuții privind atomizarea jetului de lichid care se deplasează într-un mediu gazos", se determină la început rezistența aerodinamică și mecanismele care descriu cum decurge fragmentarea picăturilor de lichid. Calculul dinamic al picăturii de lichid care se deplasează într-un mediu gazos, permite determinarea coeficientului aerodinamic funcție de raportul dintre vâscozitatea picăturii și vâscozitatea fluxului de aer. Către finalul acestui capitol sunt studiați factorii care determină perturbațiile de suprafață, după care va fi calculată variația diametrului mediu Sauter a picăturilor de combustibil funcție de viteza aerului.

În capitolul al treilea, intitulat "Transferul de căldură al picăturilor de combustibil care se deplasează într-un mediu gazos", se va determina mai întâi coeficientul de transfer difuziv, funcție de variația temperaturii aerului aspirat în motor. Se va determina prin calcul variația diametrului picăturilor de combustibil pe timpul vaporizării acestora într-un mediu gazos. Vor fi dezvoltate modele matematice pentru trei variante ale procesului de vaporizare și anume fără considerarea fenomenului de difuzie termică, apoi cu difuzie termică în dependență de temperatura și presiunea mediului gazos în care se deplasează picăturile de combustibil. Capitolul se încheie cu determinarea formei jetului de combustibil și stabilirea parametrilor procesului de atomizare a jetului de combustibil prin modelare în ANSYS.

În capitolul patru denumit "Conceperea și realizarea standului experimental destinat studiului atomizării combustibilului", vor fi precizate criteriile care stau la baza conceperii și realizării standului experimental pentru atingerea obiectivelor determinărilor experimentale. Va fi prezentat sistemul realizat de comandă și control a injectoarelor sistemelor de injecție multipunct. În capitol se va indica aparatura de cercetare utilizată și specificațiile tehnice ale acesteia. Metodica de alegere a injectoarelor precizează modul în care acestea sunt verificate la uzură prin profilometrie laser.

Capitolul al cincilea "Rezultate experimentale obținute la atomizarea jetului de combustibil", prezintă la început cercetările preliminare privind stabilirea prin profilometrie laser a gradului de uzură a injectoarelor studiate, urmate de modul de alegere a acestora pentru efectuarea măsurătorilor. În capitol se face o prezentare a contribuțiilor aduse în *Matlab Simulink* la un algoritm de recunoaștere a imaginilor unui jet de combustibil și de generare a parametrilor jetului atomizat. Experimentele au fost efectuate în diferite condiții precizate în detaliu în capitol. Astfel s-a determinat forma jetului de combustibil atomizat la un injector cu uzură scăzute și la unul cu uzură ridicată. Testările au avut loc la presiune nominală și scăzută, ultima simulând defecte ale sistemului de alimentare cu combustibil. În finalul capitolului sunt prezentate rezultatele obținute în *Matlab Simulink* cu prelucrarea imaginilor jeturilor atomizare obținute experimental.

Capitolul al şaselea, intitulat "Corecția parametrilor la injecția multipunct funcție de uzura injectoarelor", arată modul corecției sistemelor de injecție multipunct în Matlab Simulink funcție de uzura injectoarelor. În continuare sunt prezentate rezultatele obținute aplicând în Matlab Simulink anumite corecții parametrilor funcție de uzura injectoarelor. În finalul capitolului sunt precizate câteva metode necesare corijării parametrilor sistemelor de injecție multipunct care să realizeze o corelare în funcționare odată cu creșterea numărului de ore de funcționare a motorului.

Ultimul capitol, denumit "Concluzii și direcții de cercetare" începe cu o prezentare a contribuțiilor teoretice și experimentale, după care subliniază impactul cercetărilor asupra sistemelor de injecție multipunct ce echipează motoarele cu ardere internă cu aprindere prin scânteie în dependență de durata de exploatare. Direcțiile de cercetare care se impun a fi efectuate arată ce mai este necesar să se întreprindă pentru implementarea în codurile destinate injecției multipunct a unui algoritm de corecție.

Lucrarea se încheie cu bibliografia studiată, urmată de prezentarea diseminării rezultatelor și a anexelor obținute pe parcursul cercetărilor efectuate.

1. STADIUL ACTUAL PRIVIND ATOMIZAREA COMBUSTIBILULUI LA SISTEMELE DE INJECȚIE MULTIPUNCT

1.1. Introducere

Până în 1970, eforturile constructorilor de automobile au fost concentrate pe patru direcții:

- optimizarea cadenței de producție a autovehiculelor,
- creșterea puterii specifice a motoarelor,
- îmbunătățirea performanțelor de accelerare ale autovehiculelor,
- creșterea vitezei maxime atinse de vehicule.

În anii '70, mașinile americane aveau un consum mediu de 171/100km. Adesea motoarele funcționau în acea vreme la viteze mari, uneori cu doar trei rapoarte de transmisie. În 1973, odată cu criza petrolului, apar primele măsuri politice care vizau economia de energie în Europa. Constructorii de automobile au început să țină seama de consumul de combustibil încă din faza de proiectare a motorului pentru implementarea acestora la vehicul. Au început să fie introduse tehnologii tot mai performante care vizau sistemele de alimentare cu combustibil a motoarelor, procesul de amestecare, calitatea combustiei, transmisia și aerodinamica.

În ceea ce privește emisiile poluante, progresele înregistrate în ultimii ani sunt spectaculoase. Reglementări privind poluarea apar în anii '60 în SUA. În 1970 un vehicul vechi rău reglat avea $8 \div 10\%$ CO în gazele de eșapament la ralanti, în circuit urban emisiile de monoxid de carbon putând atinge 50g/km. Reglementările antipoluante au devenit din ce în ce mai stricte în Statele Unite, Japonia și Europa, contribuind astfel la reducerea cu un factor de 10 sau 100, valorile prevăzute pentru anul 2008, emisiile de poluanți majore (HC, CO, NOx) [***EN*]. Numeroase inovații tehnologice au fost puse în aplicare cu scopul de a reduce emisiile poluante:

- convertoare catalitice,
- injecția multipunct,
- chiulase cu multi-supape pentru fiecare piston în parte,
- sistemul de recirculare a gazelor de eşapament (EGR),
- dezvoltarea motoarelor care funcționează cu amestecuri sărace,
- introducerea tehnicii injecției directe a combustibilului în cilindru,
- sisteme complexe de control a motorului folosind diversi senzori și actuatori.

Atomizarea reprezintă procesul de destrămare a unui lichid în picături foarte fine prin folosirea unor dispozitive construite cu acest scop.



a) prezentare schematică. b) imagine jet atomizat. Fig. 1.1. Atomizarea jetului de lichid în picături de dimensiuni variabile.

Particulele mici de lichid sunt cunoscute și sub numele de *picături* care au o formă aproximativ sferică (fig. 1.1.). Motivul pentru care particulele au această formă se datorează tensiunii superficiale a lichidului. Acest lucru se explică prin faptul că *tensiunea superficială* face ca în lipsa forțelor externe, lichidele să ia o formă geometrică de arie minimă, datorată acțiunii forțelor de coeziune dintre moleculele lichidului. În cazul procesului de atomizare forțele din interiorul unei particule de lichid fac ca picătura să devină instabilă caz în care aceasta se rupe în picături mai mici. Pe măsură ce temperatura lichidului crește, tensiunea superficială scade. Acest lucru devine un factor important al fărâmițării atunci când utilizam aceste lichide.



Fig. 1.2. Influența vâscozității asupra formei jetului, [TB95].

Figura 1.2 [*TB95*] reprezintă modul în care vâscozitate lichidului influențează dimensiunea picăturilor pe timpul unui proces de atomizare.

O multitudine de factori influențează dimensiunea picăturilor dintr-un flux de lichid pulverizat printr-un orificiu [TB95]. Dintre acești factori *tensiunea superficială* tinde să stabilizeze un fluid, prevenind destrămarea acestuia în picături mici.

Vâscozitatea lichidului are un efect similar asupra dimensiunii picăturii ca și tensiunea superficială și previne destrămarea acesteia ceea ce conduce la creșterea dimensiunii medii a diametrului picăturii.

Densitatea mai mare a lichidului tinde să conducă ca și în cazul anterior la dimensiuni medii mai mari ale diametrului picăturilor.

1.2. Clasificarea proceselor de atomizare

Procesul de atomizare poate avea la bază mecanisme care asigură destrămarea lichidului inițial în mici ligamente apoi în picături.

Mecanismele care asigură atomizarea pot fi:

- A. Atomizarea indusă de efectul aerodinamic
- B. Atomizarea indusa de turbulență
- C. Atomizarea indusă de cavitație

În continuare sunt prezentate detaliat cele mai cunoscute metode utilizate pentru realizarea unui proces de atomizare.

A. Atomizarea sub presiune



Fig. 1.3. Principiul atomizării unui fluid sub presiune fără curenți de aer, [TB95].



Fig. 1.4. Procesul de fragmentare a jetului de lichid sub presiune, [TB95].

B. Atomizarea în curenți de aer



Fig. 1.5. Principiul atomizării în curenți de aer, [TB95].

C. Atomizarea centrifugală



Fig. 1.6. Principiul atomizării centrifugale, [TB95].

D. Atomizarea electrostatică



Fig. 1.7. Atomizarea electrostatică, [TB95].

E. Atomizarea cu ultrasunete



Fig. 1.8. Tehnologia de atomizare cu ultrasunete, [TB95].

1.3. Particularitățile formării amestecului carburant la sistemele de injecție multipunct

Evoluția sistemelor de alimentare cu combustibil a motoarelor cu ardere internă [*LL09*, ***GA*, *JT09*] a avut ca scop micșorarea consumului de combustibil mărind totodată puterea specifică. Dacă se vor compara parametrii motoarelor care echipează autovehicule fabricate în anii '90 cu cei din prezent se observă că la o aceiași cilindree, cele de producție recentă dezvoltă puteri mai mari cu $20 \div 34\%$ pentru un consum mai mic de combustibil. Inițial sistemele de injecție pe benzină au copiat principiul de la injecția diesel, iar apoi injecția diesel a copiat sistemul de alimentare de la benzina prin dezvoltarea așa numitului sistem *common rail* [*LL09*].

Sistemul de injecție multipunct s-a dezvoltat și a evoluat pornind de la injecția monopunct asigurând pentru fiecare cilindru o cantitate injectată de combustibil [***EA*, *LL09*]. Această evoluție s-a produs ca urmare a necesității de a se asigura un raport optim al amestecului aer-combustibil la fiecare cilindru în parte. Sistemele de injecție multipunct s-au dezvoltat și datorită dezvoltării subansamblelor auxiliare electronice. Ideea de bază a sistemelor de injecție controlate electronic este de a menține raportul stoechiometric între aer și combustibil, reducându-se semnificativ în același timp și noxele.

Principiul de bază al injecției multipunct se păstrează ca și la cel monopunct. Instalația este formată dintr-un sistem de alimentare cu combustibil (care are rolul de a aduce combustibilul într-o rampă comună) și un modul de comandă și control a injectoarelor. Modulul electronic controlează strict cantitatea necesară injecției și asigură ciclicitatea în concordanță cu turația motorului. Sistemul de injecție multipunct asigură formarea unui amestec optim de aer și combustibil în camera de ardere a fiecărui cilindru. Acest lucru se explică prin faptul că spre deosebire de injecția monopunct traseul parcurs de amestec nu mai diferă de la cilindru la cilindru. Injecția multipunct asigură un amestec omogen al particulelor de aer cu cele de combustibil grație sistemelor electronice chiar dacă se modifică temperatura amestecului. Pentru sistemele de injecție au fost dezvoltate două categorii [***EA*], prezentate în figura 1.9 a-b:



*Fig. 1.9. Sisteme de alimentare cu injecție directă și indirectă a benzinei, [**EA].*

Injectorul de combustibil [***EA*] este un dispozitiv electromecanic care debitează, dozează, pulverizează și direcționează combustibilul în galeria de admisie, în poarta supapei de admisie sau direct în camera de ardere. Injectorul de combustibil prezentat în figura 1.11 asigură atomizarea combustibilului.



Fig. 1.10. Secțiune longitudinală printr-un injector electromagnetic, [**EA].

- 1. garnituri (O-ring-uri);
- 2. filtru;
- 3. carcasă; (prevăzută cu conector electric);
- 4. solenoid;
- 5. arc elicoidal de revenire;
- 6. acul injectorului (armătura mobilă);
- 7. sediul supapei (cu orificii);
- 8. contacte electrice

Atunci când sistemul de control a injecției transmite un semnal către înfășurarea solenoidului armătura acestuia ridică acul cu $60-100\mu m$ moment în care se realizează injecția de combustibil [DD11]. Timpul de răspuns este situat între $15 \div 18ms$ la o frecvență de control de $3\div 125Hz$ funcție de tipul de injecție și de condițiile de funcționare.

1.4. Dinamica jetului de lichid, a anvelopei și picăturilor la injecția combustibilului

1.4.1. Instabilitatea capilară a jeturilor de lichid libere neînecate

Un jet de lichid care provine de la duza unui dispozitiv de pulverizare injectat într-un mediu gazos, se destramă în picături mici, dacă acesta este supus unor perturbări [AN11]. Perturbările care stau la baza fărâmițării combustibilului pot fi datorate:

- deplasărilor de suprafață,
- presiunii,
- fluctuații lor vitezei lichidului în sistemul de alimentare sau la suprafața jetului,
- modificării proprietăților lichidului injectat datorate temperaturii, vâscozității sau coeficientului de tensiune superficială.

Instabilitatea și destrămarea jetului de lichid în picături [AN11, CR78] a reprezentat un subiect de interes încă din secolul al XIX-lea și continuă și în prezent întrucât acest fenomen influențează calitatea procesului de ardere. Pentru fiecare lungime de undă a unui perturbații instabile, se formează o picătură principală și una sau mai multe picături satelit de obicei mai mici. Figura 1.14 [VP91, AN11] prezintă imaginea unui jet de lichid supus unor perturbații care conduc la declanșarea instabilității acestuia moment după care se formează picăturile de lichid inclusiv cele de tip satelit.



Fig. 1.11. Instabilitatea unui jet de lichid cu formarea picăturilor principale și a celor de tip satelit, [VP91, AN11].

În figura 1.15 este prezentată destrămarea jetului în cazul în care perturbarea acestuia decurge astfel încât se formează doar picături principale nu și cele de tip satelit.



Fig. 1.12. Destrămarea uniformă a unui jet de lichid în picături principale, [VP91, AN11].

Un studiu clasic al instabilității capilare a jetului de lichid a fost publicat în anii 1878-1879 în lucrările lui Lord Rayleigh [*RW78*]. Pornind de la premisa unui lichid ideal, acesta a obținut o ecuație a ratei de creștere a unei suprafețe cu perturbații axisimetrice luând în calcul energiile potențialele și cinetice ale debitului injectat. Pentru explicarea fenomenului de destrămare a jetului de lichid în picături, în anul 1931 Weber [WC31] a introdus efectul vâscozității asupra destrămării jetului în baza ecuațiilor tridimensionale cu derivate parțiale ale hidrodinamicii lichidelor vâscoase newtoniene. El a descoperit că influența vâscozității lichidului asupra procesului de destrămare constă în preschimbarea creșterii rapide a lungimilor de undă mari într-o încetinire a ritmului de creștere, fără a se modifica valoarea lungimii de undă de referință.

1.4.2. Ecuații de bază privind dinamica jetului

Nasser Ashgriz ca editor [AN11] realizează o sinteză a principalelor ecuații care caracterizează dinamica jetului de lichid care se deplasează într-un mediu gazos. Ecuațiile Navier-Stokes (1.1) și cea de continuitate (1.2) [CR78, IJ07, MH10, AN11, AB13, CR78, WM10] pentru curgerea de tip newtonian a unui lichid considerat incompresibil, pot fi scrise ca:

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_i = \mathbf{0},\tag{1.1}$$

$$\frac{D\mathbf{u}_i}{Dt} = \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial t} + \mathbf{u}_i \cdot \nabla \mathbf{u}_i = -\frac{\nabla P_i}{\rho_i} + v_i \nabla^2 \mathbf{u}_i + \mathbf{g} + \frac{\mathbf{F}}{\rho}, \qquad (1.2)$$

unde u_i - vectorul viteză, P_i - presiunea, v_i - vâscozitatea cinematică, $v_i = \mu_i / \rho_i$, μ_i - vâscozitatea dinamică, ρ_i - densitatea, \mathbf{g} - vectorul accelerație gravitațională, \mathbf{F} - forța. Indicele *i* este înlocuit pentru gaz cu *g* și *l* pentru lichid.

În cazul suprafețelor libere și a interfețelor sunt luate în considerare două condiții la limită. Prima condiție la limită corespunde echilibrului tensiunilor iar cealaltă condițiilor cinematice. Echilibrul tensiunilor de la interfața lichidului și mediul său înconjurător este definitorie pentru evoluția formei suprafeței lichidului când aceasta se destramă. Acest echilibru este reglementat atât de către forțele datorate tensiunii superficiale cât și a forțelor datorate frecării vâscoase [AN11, CR78, BK09]:

$$(p_l - p_g + \sigma k)\mathbf{n} = (\boldsymbol{\tau}_l - \boldsymbol{\tau}_g) \cdot \mathbf{n},$$
 (1.3)

unde τ_l – tensorul tensiunii superficiale a mediului lichid, τ_{e} – tensorul tensiunii superficiale a mediului gazos, **n** - vectorul unitate normal la interfață, σ - tensiunea superficială, k - curbura medie la interfață.

În figura 1.16 s-a reprezentat un jet de lichid instabil care tinde să se destrame în picături, reliefându-se dimensiunile care caracterizează unda formată.



b) experimental [AA08] Fig. 1.13. Reprezentare schematică a unui jet de lichid instabil, [AA08, AN11].

Utilizând notațiile din figura 1.16 se poate deduce curbura medie la interfață:

$$k = \nabla \cdot \mathbf{n} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2},\tag{1.4}$$

relație care se mai poate scrie sub forma:

$$k = \left(\frac{1}{\sqrt{R_{i}\left(1+R_{x}^{2}\right)}} - \frac{R_{xx}}{\sqrt[3]{\left(1+R_{x}^{2}\right)^{2}}}\right),$$
(1.5)

unde R_1 și R_2 – razele de curbură ale interfeței jetului de lichid din figura 1.16-a, iar indicele x indică derivata în raport cu x.

Condițiile la limită cinematice presupun că lichidul nu traversează suprafața liberă, și prin urmare, componenta normală a vitezei interfeței este continuă pe întreaga interfață:

$$\mathbf{u}_l \cdot \mathbf{n} = \mathbf{u}_g \cdot \mathbf{n}. \tag{1.6}$$

Odată ce ecuațiile de mai sus sunt adimensionale, folosind o mărime pentru lungime (R_3 - raza jetului neperturbat), și o mărime pentru viteză (U - viteza medie a jetului), rezultă:

$$Re_i = \frac{\rho_i U_i R_3}{\mu_i},\tag{1.7}$$

$$We_i = \frac{\rho_i U_i^2 R_3}{\sigma}.$$
(1.8)

Ecuațiile (1.7) și (1.8) reprezintă numerele Reynolds și Weber (adimensionale) pentru curgerea fazei lichide sau gazoase care iau în considerare proprietățile fluidului de lucru și a vitezei acestuia. După cum se știe *numărul Reynolds* reprezintă raportul dintre inerție și forțele vâscoase în timp ce *numărul Weber* reprezintă raportul dintre inerție și forțele de tensiune superficială. Pornind de la expresiile matematice ale celor două numere [AN11], eliminând viteza, s-a obținut *numărul Ohnesorge*:

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma R_3}} = \sqrt{z}.$$
(1.9)

Utilizând număr Ohnesorge se pot face aprecieri asupra proprietăților fluidului de lucru. Astfel un număr *Oh* redus indică fie o vâscozitate redusă, fie o tensiune superficială mare a lichidului. Când efectele gravitaționale sunt importante, este recomandat să se utilizeze numărul Bond care reprezintă raportul dintre forțele gravitaționale la forțele de tensiune superficială, acesta fiind definit ca:

$$Bo = \frac{\rho g R_3^2}{\sigma}.$$
 (1.10)

Alți parametri importanți sunt rapoartele relative ε și μ_r ale densității și vâscozității cele două fluide (lichid și gazos):

$$\varepsilon = \frac{\rho_g}{\rho_l},\tag{1.11}$$

$$\mu_r = \frac{\mu_g}{\mu_l}.\tag{1.12}$$

1.4.3. Instabilitatea capilară a unui jet de lichid nevâscos

Ecuațiile (1.1) și (1.2) pot fi scrise în cazul curgerii unui jet de lichid, în coordonate cilindrice, considerând $\mathbf{u}_i = (u_i, v_i, w_i)$, pentru vitezele pe direcția axială, x, radială, r, și de azimut, θ .

Ecuația de continuitate [AN11, MH10, AB13, CR78, WM10] este :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x} + \frac{\partial v_i}{\partial r} + \frac{v_i}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_i}{\partial \theta} = 0, \qquad (1.13)$$

iar ecuațiile Navier-Stokes [AN11, MH10, AB13, CR78, WM10] sunt:

 ρ_i

$$\begin{aligned}
\rho_{i} \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial t} + v_{i} \frac{\partial u_{i}}{\partial r} + \frac{w_{i}}{r} \frac{\partial u_{i}}{\partial \theta} + u_{i} \frac{\partial u_{i}}{\partial x} \right) &= \\
&= -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu_{i} \left(\frac{\partial^{2} u_{i}}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_{i}}{\partial r} + \frac{1}{r^{2}} \frac{\partial^{2} u_{i}}{\partial \theta^{2}} + \frac{\partial^{2} u_{i}}{\partial x^{2}} \right) + F_{x}, \\
\rho_{i} \left(\frac{\partial v_{i}}{\partial t} + v_{i} \frac{\partial v_{i}}{\partial r} + \frac{w_{i}}{r} \frac{\partial v_{i}}{\partial \theta} + u_{i} \frac{\partial v_{i}}{\partial z} - \frac{w_{i}^{2}}{r} \right) &= \\
&= -\frac{\partial P_{i}}{\partial r} + \mu_{i} \left(\frac{\partial^{2} v_{i}}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_{i}}{\partial r} - \frac{v_{i}}{r^{2}} + \frac{1}{r^{2}} \frac{\partial^{2} v_{i}}{\partial \theta^{2}} + \frac{\partial^{2} v_{i}}{\partial x^{2}} - \frac{2}{r^{2}} \frac{\partial w_{i}}{\partial \theta} \right) + F_{r}, \\
\rho_{i} \left(\frac{\partial w_{i}}{\partial t} + v_{i} \frac{\partial w_{i}}{\partial r} + \frac{v_{i}w_{i}}{r} + \frac{w_{i}}{r} \frac{\partial w_{i}}{\partial \theta} + u_{i} \frac{\partial w_{i}}{\partial x} \right) &= \\
q_{i} - \frac{1}{r} \frac{\partial P_{i}}{\partial \theta} + \mu_{i} \left(\frac{\partial^{2} w_{i}}{\partial r^{2}} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_{i}}{\partial r} - \frac{w_{i}}{r^{2}} + \frac{1}{r^{2}} \frac{\partial^{2} w_{i}}{\partial \theta^{2}} + \frac{\partial^{2} w_{i}}{\partial x^{2}} + \frac{2}{r^{2}} \frac{\partial v_{i}}{\partial \theta} \right) + F_{\theta}. \end{aligned}$$
(1.16)

Dacă prin ipoteză se consideră că mediul gazos exterior nu influențează anvelopa jetului de picături atunci se poate neglija efectul acestuia. Ecuațiile care guvernează jetul de lichid ajuns la instabilitate pot fi liniarizate pentru perturbații mici ale vitezei, presiunii și razei jetului: $u = \overline{u} + u'$, $v = \overline{v} + v'$, $p = \overline{p} + p'$, $R = R_3 + \zeta$, unde R_3 - raza jetului neperturbat, ζ - amplitudinea undei. Viteza axială a jetului poate fi eliminată caz în care sistemul poate fi considerat o coloană de lichid staționar într-un mediu inactiv.

O soluție simplificată pentru instabilitate în cazul unui jet de lichid nevâscos în regim staționar ($\overline{u} = \overline{v} = 0$) [AN11, MH10, AB13, CR78, WM10] face obiectul unei perturbații axisimetrice (fără perturbări pe direcția θ). În acest caz, forma liniarizată a ecuațiilor este:

$$\frac{\partial u'}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial x},\tag{1.17}$$

$$\frac{\partial v'}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p'}{\partial r},\tag{1.18}$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial rv'}{\partial r} + \frac{\partial u'}{\partial x} = 0.$$
(1.19)

După definirea unei funcții de potențial ϕ și integrarea ecuației de impuls, se obține:

$$p' = -\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} + \sigma k, \qquad (1.20)$$

unde ϕ - funcția potențial definită ca: $v' = \frac{\partial \phi}{\partial r}$, $vu' = \frac{\partial \phi}{\partial x}$, σk - constantă de integrare, obținută pentru jetul staționar. Din ecuația de continuitate ϕ trebuie să fie o soluție pentru Laplacianul funcției de potențial, $\nabla^2 \phi = 0$, unde operatorul Laplace este exprimat în coordonate cilindrice [AN11, BV68, CR78]. Presupunând o perturbare periodică a razei de-a lungul axei x, căutăm o soluție de forma:

$$\phi = \Phi(r) \exp(ikx + \omega t), \qquad (1.21)$$

unde λ – lungimea de undă a jetului de lichid (figura 1.16), $k = 2\pi/\lambda$ este un număr real pozitiv ce variază funcție de λ , ω – rata de creștere a perturbației jetului.

După înlocuire în ecuația de continuitate se obține:

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{d\Phi}{dr}\right) - k^2\Phi = 0.$$
(1.22)

Aceasta este o ecuație Bessel, iar în acest caz, soluțiile ecuației se numesc funcții Bessel modificate, *Io* și *Ko* de prima speță fiind definite prin: $I_n(kr) = (-i)^n J_n(ikr)$. Din moment ce *Ko* nu este influențată de condiția r = 0, acesta este eliminat, iar ecuația (1.22) devine:

$$\phi = \operatorname{AI}_{0}(kr). \tag{1.23}$$

Analiza instabilității liniare a arătat că:

- jetul de lichid este stabil pentru toate perturbațiile unghiulare,

- doar perturbațiile axiale conduc la instabilitatea jetului de lichid.

Acest lucru este legat de faptul că numai perturbațiile axisimetrice pot reduce energia de suprafață. Prin urmare, se vor lua în considerare doar perturbațiile axiale.

Amplitudinea perturbației ζ este legată de viteza pe direcție radială a suprafeței undei prin relația $v' = \partial \zeta / \partial t$ la $R_3 = r$. Prin urmare, perturbația ζ poate fi determinată din ecuația:

$$\zeta = A \frac{k}{R_3} I_1(kR_3) e^{(ikx + \omega t)}.$$
(1.24)

Condițiile curgerii axisimetrice (de-a lungul axei jetului) sunt:

$$v = 0$$
 și $\frac{\partial v'}{\partial r} = 0$ la $r = 0$

Condițiile la limită pentru presiune sunt date de ecuația Young-Laplace (1.3) și (1.4), care pentru un jet axisimetric pot fi scrise ca:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_3 + \zeta},$$
(1.25)

$$\frac{1}{R_2} = \frac{-\zeta_{xx}}{\left(1 + \zeta^2\right)^{\frac{3}{2}}},\tag{1.26}$$

unde indicele x reprezintă derivata în raport cu x, de ex. $(\zeta_{xx} = \partial^2 \zeta / \partial x^2)$.

Conform figurii 1.16 secțiunea transversală are raza instantanee $R_i = R_3 + \zeta$.

Ecuațiile de mai sus pot fi simplificate prin aproximări liniare, pentru perturbații mici, folosind dezvoltarea în serie Taylor:

$$\frac{1}{R_{1}} = \frac{1}{R_{3} + \zeta} = \frac{1}{R_{3} \left(1 + \frac{\zeta}{R_{3}}\right)} \approx \frac{1 - \frac{\zeta}{R_{3}}}{R_{3}},$$
(1.27)

۶

$$\frac{1}{R_2} = -\zeta_{xx}.$$
 (1.28)

Presiunea la suprafața jetului poate fi determinată cu relația:

$$p = \frac{\sigma}{R_3} - \frac{\sigma}{R_3^2} \Big(\zeta + R_3^2 \zeta_{xx} \Big).$$
(1.29)

Această ecuație este valabilă doar pentru perturbații cu amplitudini mici, atunci când este valabilă aproximarea $\zeta/R_3 << 1$. Când ecuația (1.32) pentru presiunea p la suprafața jetului este echivalată cu ecuația (1.24), la $r = R_3$ și simplificată printr-o aproximație liniară, amplitudinea dispare. Rămânem cu o relație caracteristică între rata de creștere și numărul de undă, determinând spectrul perturbației. Rezolvând rata de creștere, avem:

$$\omega^{2} = \frac{\sigma k}{\rho R_{3}^{2}} \left(1 - k^{2} R_{3}^{2} \right) \frac{I_{1}(kR_{3})}{I_{0}(kR_{3})}, \qquad (1.30)$$

unde $\omega = \omega_r + i\omega_i$, $i = \sqrt{-1}$, ω_r - rata de creștere, ω_i - frecvența de oscilație.

În cazul în care partea reală a ratei de creștere este pozitivă, perturbațiile cresc exponențial în timp. Raportul funcțiilor Bessel modificate este pozitiv pentru toate condițiile $(I_1/I_0>0)$. Acest lucru înseamnă că ω este real pozitiv, atâta timp cât $kR_3 < 1$.

Deci orice perturbație periodică asupra jetului care are un număr de undă care satisface condiția $0 < kR_3 < 1$ face ca jetul de lichid sa fie instabil. Rata de creștere pentru o astfel de instabilitate este dată de ecuația (1.33).

1.5. Procesul de atomizare. Introducere.

Jeturile de combustibil utilizate în motoarele cu ardere internă sunt produse în diferite moduri, în funcție de aplicație și de cerințele fiecărei aplicații.

Există trei procese de bază [AN11, GS13, RD87] asociate cu toate metodele de atomizare:

- curgerea internă în duză,
- atomizarea primară,
- atomizarea secundară.

Structura jetului pulverizat și caracteristicile de pulverizare [GS13] depind de:

- geometria internă a duzei,
- presiunea de injectie,
- valorile presiunii și temperaturii din camera de ardere.

În figura 1.18 pot fi urmărite cele trei zone ale unui jet pulverizat și detalii ale zonelor atunci când are loc destrămarea combustibilului.



Fig. 1.14. Evidențierea structurii și a fenomenului de destrămare a jetului, [GS13].

Curgerea internă în duză ia în considerare forma duzei care are un efect major asupra structurii jetului pulverizat și a proprietăților sale.

Atomizarea primară a combustibilului depinde de interacțiunea lichidului cu mediul gazos înconjurător care conduce la destrămarea inițială a acestuia în picături. În apropierea miezului jetului de lichid se formează ligamentele largi care se dezintegrează în altele mai mici iar apoi în picături sferice. Modelele privind atomizarea primară țin seama de fenomenul de cavitație și de turbulență (figura 1.18) care influențează puternic procesul de atomizare.

Atomizare secundară [FG95] începe când atomizarea primară a fost finalizată (imediat după ce sunt create picăturile sferice) procesul depinzând de dimensiunile inițiale ale picăturii, viteza relativă dintre picături și gazul înconjurător și de proprietățile fizice ale sistemului (presiune, temperatură, vâscozitate, tensiune superficială, etc.). Acești parametri determină mecanismul ruperii prin care o picătură se va destrăma în continuare.

1.6. Modele de atomizare

Conform literaturii de specialitate studiate [RD87, IJ07, SP99, PP14] se poate afirma că există o multitudine de modele dezvoltate pentru analiza procesului de atomizare a lichidelor.

Pentru a caracteriza procesul de atomizare a combustibililor se folosesc deseori coduri CFD - Computational Fluid Dynamics, acestea având la bază o serie de modele de pulverizare.

În continuare sunt enumerate cele mai reprezentative dintre modelele utilizate.

1. Modele 0D

- 1.1. Modele privind determinarea lungimii de fragmentare a lichidului
- 1.2. Modele privind determinarea lungimii de penetrare a jetului
- 1.3. Modele pentru determinarea evazării jetului
- 1.4. Modele pentru determinarea Diametrului Mediu Sauter (SMD)

2. Modelarea multidimensională

2.1. Destrămarea primară

Scopul urmărit de acest modele este să stabilească condițiile inițiale în care picăturile pătrund într-un mediu gazos urmărindu-se să se determine diametrul și viteza acestora. În figura 1.20 este prezentată o reprezentare grafică [*BC02*] în care sunt date detaliile destrămării unui jet de combustibil.



Fig. 1.15. Structura zonelor la destrămarea primară și secundară, [BC02].

Au fost dezvoltate mai multe modele [MH10, BC02] în continuare fiind prezentate cele mai cunoscute dintre acestea.

Modelul picăturii:

Modelul picăturii a fost dezvoltată de către Reitz și Diwakar în anul 1987, fiind printre cele mai cunoscute datorită simplității sale.

Se consideră prin ipoteză conform figurii 1.21 că pentru zona primară nu este necesară o analiză detaliată a proceselor de atomizare și dezintegrare a lichidului în jetul pulverizat.



Fig. 1.16. Modelul picăturii, [după SF11].

Conform figurii 1.21 acest model consideră că prin destrămarea primară se formează picături sferice mari care au un același diametru (de obicei egal cu diametrul orificiilor duzei), care apoi sunt supuse unei destrămări secundare.

Modelul Huh al destrămării induse de turbulență:

Un model frecvent utilizat pentru atomizare primară a unui jet de lichid a fost dezvoltat de către Huh și colaboratorii [*HK98*]. Modelul ia în considerare efectele datorate undelor la suprafața jetului, a turbulenței jetului și inclusiv a dinamicii cavitației.

Modelul se bazează pe două ipoteze principale. Conform primei ipoteze mărimea turbulenței reprezintă factorul predominant în procesul de atomizare:

$$L_A = C_1 L_t = C_2 L_w, (1.31)$$

unde L_t , L_w – scara de mărime a turbulenței respectiv a lungimii de undă a perturbațiilor de suprafață. Prin cea de-a doua ipoteză se consideră că durata timpului de atomizare τ_A reprezintă suma timpului de producere a turbulenței τ_t cu cel în care se dezvoltară unda τ_w :

$$\tau_A = C_3 \, \tau_t + C_4 \, \tau_w. \tag{1.32}$$

În cele două relații se utilizea ză constantele empirice:

$$C_1 = 2,0; C_2 = 0,5; C_3 = 1,2; C_4 = 0,5.$$

Determinarea lungimii inițiale a turbulenței și a timpului cât aceasta se produce se calculează folosind valorile medii ale energie cinetice din turbulență k_{med} și a gradului de disipare a energiei ε_{med} :

$$L_t^0 = C_\mu \frac{\sqrt[3]{k_{med}^2}}{\varepsilon_{med}}; \ \tau_t^0 = C_\mu \frac{k_{med}}{\varepsilon_{med}},$$
(1.33)

unde $C_{\mu}=0,09$ este o constantă.

Energia cinetică și gradul de disipare sunt estimate ca fiind valorile medii [AN11]:

$$k_{med} = \frac{U^2}{8\left(\frac{L}{D}\right)} \left[\frac{1}{c_d^2} - K_c - (1 - s^2)\right],$$
(1.34)

$$\varepsilon_{med} = k_{\varepsilon} \frac{U^2}{2L} \left[\frac{1}{c_d^2} - K_c - \left(1 - s^2\right) \right], \qquad (1.35)$$

unde L - lungimea orificiului duzei, D - diametrul duzei, c_d - coeficientul de descărcare a duzei, K_c - constantă care ia în considerare pierderile din colțul contracției (stabilită $K_c = 0.45$), K_{ε} - constanta de disipare a energiei turbulente medii (stabilită $K_{\varepsilon} = 0.27$), s - raportul contracției ariei duzei la intrarea și ieșirea combustibilului.

Mărimea lungimii turbulenței și a duratei acesteia sunt date ca funcție de timp și condițiile inițiale ale turbulenței:

$$L_{t}(t) = L_{t}^{0} \left(1 + \frac{0,0828t}{\tau_{t}^{0}} \right)^{0,457}, \qquad (1.36)$$

$$\tau_t(t) = \tau_t^0 + 0,0828 t$$
 (1.37)

$$\tau_{w} = \frac{L_{w}}{U} \sqrt{\frac{\rho_{l}}{\rho_{g}}}$$
(1.38)

Pentru jetul de lichid injectat rata de destrămare a picăturilor dD_p/dt , este proporțională cu raportul dintre lungimea L_A și timpul t_A de atomizare:

$$\frac{dD_p}{dt} = k_1 \frac{L_A}{t_A},\tag{1.39}$$

unde k_1 – este o constantă apropiată de valoarea unitară. Dimensiunea picăturii obținute prin calcule se presupune a fi egală ca mărime cu lungimea de atomizare, L_4 , ca în ecuația (1.39).

Când în prima zona se atinge dimensiunea picăturii secundare, procesul de atomizare primară pentru acest pachet se presupune a fi completat și modelul de atomizare secundar se poate folosi ca fiind cel de urmat.

Pentru a lua în considerare influența forțele aerodinamice asupra inimii lichidului pulverizat [*MB94*], se poate presupune că miezul este în formă de pană, cu un coeficient aerodinamic $C_D=0,3$. Această ipoteză poate fi corectată prin creșterea coeficientului de rezistență aerodinamică cu scopul de a se lua în considerare instabilitățile de la interfața lichid/gaz, care perturbă suprafața lichidului și fluxul de gaz din jurul miezului lichid.

Modelul destrămării induse de cavitație:

Unul dintre primele modele care pun destrămarea jetului pe seama cavitației apărute la curgerea lichidului de presiune ridicată prin duza unui injector a fost cel dezvoltat în 1997 de Arcoumanis and Gavaises [SF11].

Diametrul inițial al picăturilor se consideră egal cu cel al duzei injectorului ca și la modelul picăturii. Bulele datorate cavitației sunt transportate la suprafață datorită vitezei jetului turbulent din interior.

Modelul LISA:

Modelul LISA (*Linearized Instability Sheet Atomization*) a fost dezvoltat de către Schmidt și colaboratorii [*SD99*, *SP99*], cu scopul de a modela destrămarea primară a lichidului la ieșirea dintr-un injector de înaltă presiune, în cazul injecție directă pe benzină. Datorită dezvoltării forțelor centrifuge datorate miscării turbionare, la ieșirea din orificiul injectorului se formează un film de lichid pe pereții duzei. Grosimea acestui film se notează cu h_o , și se calculează folosind ecuația debitului masic:

$$m_{l} = \pi \,\rho_{l} \,u \,h_{o} \left(d_{o} - h_{o}\right), \tag{1.40}$$

unde ρ_{l_0} – densitatea lichidului injectat, u – componenta vitezei axiale la ieșirea jetului din duză care se determină cunoscând unghiul conului de pulverizare, d_0 – diametrul orificiului de injecție. Se consideră prin ipoteză că avem un model bidimensional, lichidul este incompresibil de grosime $2h_0$ și se ia în considerare vâscozitatea acestuia și viteză U. Jetul de lichid se consideră pulverizat într-un gaz ideal, fără a se lua în considerare turbulența. Destrămarea jetului este pusă pe seama perturbării undelor a căror grad de creștere este:

$$\omega_r = -2v_l k^2 + \sqrt{4v_l^2 k^4 + \rho_r U^2 k^2 - \frac{\sigma k^3}{\rho_l}},$$
(1.41)

unde ρ_r - raportul dintre densitatea aerului și cea a combustibilului, k - numărul de undă. Această relație poate fi maximizată numeric obținând rata de creștere maximă ω_{max} , care este apoi utilizată pentru determinarea timpului și a lungimii în cazul destrămării jetului.

$$\tau = \frac{1}{\omega_{max}} ln \left(\frac{\zeta_b}{\zeta_0}\right), \tag{1.42}$$

$$L = U \tau = \frac{U}{\omega_{max}} ln \left(\frac{\zeta_b}{\zeta_0}\right), \tag{1.43}$$

unde $ln\left(\frac{\zeta_b}{\zeta_0}\right) = 12 [AN11]$. Grosimea peliculei la jumătatea lungimii, este:

$$h = \frac{2h_0(d_0 - h_0)}{(2L\sin\theta + d_0 - h_0)(\cos\theta)}$$
(1.44)

unde h_o - grosimea stratului măsurat perpendicular pe axa injectorului la ieșirea din duză.

În momentul destrămării jetului se formează ligamente de fluid, a căror diametre se pot calcula din bilanțul de masă:

$$d_L = \sqrt{\frac{16\,h_b}{k_{\text{max}}}} \tag{1.45}$$

unde k_{max} reprezintă numărul de undă corespunzător creșterii maxime ω_{max} și a lui h_b pentru zona de destrămare. Ruperea ligamentelor crește odată ce amplitudinea undelor instabile ce devin egale cu raza acestora, având ca rezultat formarea picăturilor cu diametrul d_D :

$$d_{D} = \sqrt[3]{\left(\frac{3\pi d_{L}^{2}}{K_{L}}\right)}, \quad unde \quad K_{L} = \frac{1}{d_{L}} \left[\frac{1}{2} + \frac{3\mu_{l}}{2\sqrt{\rho_{l}\sigma d_{L}}}\right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (1.46)$$

unde K_L reprezintă numărul Weber pentru rata maximă de creștere a undei la destrămarea unei coloane cilindrice de lichid vâscos (ligamente, în acest caz).

Modelul KH (Kelvin-Helmholtz):

Modelul de destrămare Kelvin-Helmholtz (KH), dezvoltat de Reitz și Diwakar [*RR87*] și îmbunătățit de Reitz [*RD87*], se bazează pe analiza creșterii instabilității liniare KH a unui jet de lichid cilindric pulverizat cu o anumită viteză într-un mediu gazos ideal în condiții staționare. Modelul are la bază figura 1.22 în care sunt prezentați parametrii jetului de lichid care începe să se destrame.



Fig. 1.17. Modelul KH al destrămării primare, [SF11].

Modelul furnizează pentru destrămarea primară rata de creștere ω_{max} și lungimea de undă aferentă, k_{max} :

$$\omega_{max} \left[\frac{\rho_l r_o^3}{\sigma} \right]^{0.5} = \frac{0.34 + 0.38W e_g^{-1.5}}{\left(1 + Oh \right) \left(1 + 1.4 \left(Oh \cdot W e_g^{0.5} \right)^{0.6} \right)},\tag{1.47}$$

$$\frac{k_{max}}{r_o} = 9,02 \frac{\left(1+0,450h^{0.5}\right) \left(1+0,4\left(Oh \cdot We_g^{0.5}\right)^{0.7}\right)}{\left(1+0,87We^{1.67}\right)^{0.6}},$$
(1.48)

unde Oh este numărul Ohnesorge obținut în baza proprietăților lichidului.

Plecând de la premisa că dimensiunile picăturilor dislocate sunt proporționale cu lungimea undei care are viteza de creștere maximă a suprafeței, caz în care rata de generare a picăturilor este proporțională cu rata de destrămare maximă datorate perturbării jetului, ω_{max} , se obțin expresiile pentru raza, r, și pentru constanta de timp, τ , a picăturii produse:

$$r = \begin{cases} B_o \lambda_{max} & \text{pentru } B_o \lambda_{max} \le r_o \\ \min \begin{bmatrix} \left(\frac{3\pi r_o^2 u_r}{2\omega_{max}}\right) \\ \left(\frac{3r_o^2 \lambda_{max}}{4}\right)^{0,33} & \text{pentru } B_o \lambda_{max} > r_o \end{bmatrix} \\ \tau = 3,726 \cdot \frac{B_1 r_o}{k_{max} \omega_{max}} \end{cases}$$
(1.49)

unde B_0 , B_1 [PM98] sunt constante. Pentru $We \rightarrow 0$ și $We \rightarrow \infty$ timpul de destrămare, τ , este:

$$\tau = \begin{cases} 0,82 B_1 \sqrt{\frac{\rho_l r_o^3}{\sigma}} & \text{la destrămarea în forma peliculară} \\ B_1 \sqrt{\frac{\rho_l}{\sigma}} \cdot \frac{r_o}{|U|} & \text{la destrămarea prin forfecare} \end{cases}$$
(1.50)

Destrămarea în formă peliculară și cea datorată forfecării corespund experimentărilor cu We>6 respectiv $We / \sqrt{Re_G} > 0,5$ aferente numerelor Weber și Reynolds care țin seama de raza picăturii. Rata de micșorare a razei picăturii inițiale, r_o , este dată de:

$$\frac{dr_0}{dt} = -\frac{r_0 - r}{\tau}; \quad r \le r_0.$$
(1.51)

Diferența dintre modelele prezentate de Reitz și Diwakar [*RR87*] și Reitz [*RD87*] constă în modul în care picăturile se formează. Reitz și Diwakar, într-o primă abordare nu fac nici o distincție între mărimea picăturile inițiale și a celor formate prin destrămare. În acest caz jetul se dezintegrează în picături cu dimensiuni identice și nu apar picături mai mici.

Există diverse metode [BC02, CC05, AN11, MH10] de abordare și îmbunătățire a acestei metode.

2.2. Destrămarea secundară

Procesul de destrămare secundară constă în fărâmițarea picăturilor primare deja formate în altele mai mici datorită forțelor aerodinamice. Aceste forțe sunt induse de viteza relativă a picăturilor de combustibil față de mediul gazos în care acestea evoluează. Ca rezultat apare fenomenul de creștere a instabilității undelor de la suprafața picăturilor care conduc la dezintegrarea picăturilor în altele mai mici. Acest mecanism este de obicei caracterizat de numere Weber mai mari de 800 și seamănă cu mecanismul de rupere prin forfecare. În figura 1.23 [AN11] este prezentat schematic procesul de destrămare a picăturii combinat cu mecanismul de forfecare a stratului limită. Această abordare este diferită de cea a modelului KH-RT propus de Patterson și Reitz [PM98], întrucât ia în considerare numai două mecanisme.



Fig. 1.18. Ilustrarea destrămării secundare a picăturilor de lichid, [AN11].

Modelele destrămării prin analogie Taylor (TAB și E-TAB):

Modelul TAB privind destrămarea jetului în picături a fost dezvoltat de către O'Rourke și Amsden [*RP87*] fiind considerat un model de calcul standard. Modelul se bazează pe o analogie între picătura oscilantă și distorsionată și un sistem masă-resort. Forța de revenire la forma inițială a resortului corespund forțelor de tensiune superficială, în timp ce forța exterioară a masei este echivalată cu forța aerodinamică a mediului gazos. Forța de amortizare este pusă pe seama efectelor de vâscozitate ale lichidului. Principala limită a modelului TAB este că ia în considerare un singur mod de oscilație, în timp ce în realitate există mai multe moduri.

Ecuația de amortizare a oscilațiilor armonice forțate este:

$$m\ddot{x} = F - k_s x - d_a \dot{x},\tag{1.52}$$

unde x - deplasarea , F - forțele externe (corespunzătoare rezistenței aerodinamice), k_s - constanta de elasticitate (care corespunde tensiunii superficiale), d_a - constanta de amortizare (corespunzătoare forțele vâscoase).

În conformitate cu analogia Taylor, pot fi scrise relațiile de legătură între coeficienții:

$$\frac{F}{m} = C_f \frac{\rho_g u^2}{\rho_l r}; \ \frac{k_s}{m} = C_k \frac{\sigma}{\rho_l r^3}; \ \frac{d_a}{m} = C_d \frac{\mu_l}{\rho_l r^2}.$$
(1.53)

unde C_f , C_k , C_d - parametri adimensionali. Acum, ecuația 1.55 poate fi scrisă ca:

$$\ddot{y} = \frac{C_f}{C_b} \frac{\rho_g}{\rho_l} \frac{u^2}{r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_l r^3} y - \frac{C_d \mu_l}{\rho_l r^2} \dot{y}.$$
(1.54)

Se consideră că are loc destrămarea picăturilor dacă și numai dacă y>1. De asemenea, se presupune că destrămarea are loc dacă și numai dacă amplitudinea de oscilație a picăturii, este egală cu raza picăturii. Constantele adimensionale C_6 , C_k , și C_d sunt determinate pe seama rezultatele experimentale [SD99], adoptându-se uzual valorile: $C_k=8$; $C_d=5$; $C_b=0,5$; $C_f=1/3$. Grover și colaboratorii [GR02], propun $C_k=6$ pentru utilizarea jetului de benzină în aplicații ale sistemelor de injecție directă. Pentru a anticipa dimensiunile picăturii după destrămare, se poate utiliza ecuația conservării energiei. O energie de bilanț ia în considerare egalitatea dintre energia picăturii inițiale (înainte de destrămare) și energia picăturilor formate:

$$\frac{r}{\bar{r}_{32}} = 1 + \frac{8K}{20} + \frac{\rho_l r^3}{\sigma} \dot{y}^2 \left(\frac{6K - 5}{120}\right),\tag{1.55}$$

unde \overline{r}_{32} - Raza Medie Sauter (SMR) a picăturii incipiente, K - constantă care trebuie să fie evaluată experimental prin măsurarea dimensiunii picăturii. O'Rourke și Amsden [*RP87*] sugerează valoarea K = 10/3.

Modelul îmbunătățit TAB (E-TAB) a fost dezvoltat în 1997 de către Tanner [*TF97*] în care destrămarea are loc în cascadă, mărimea picăturilor fiind redusă în mod continuu, până când producerea picăturilor devine stabilă. Modelul menține dinamica de deformare a picăturilor ale modelului TAB [*RP87*].

Conform acestei abordări, distorsiunea picăturii este dată de oscilații armonice amortizate forțat când forțele de amortizare corespund interacțiunii aerodinamice a picăturilor cu mediul gazos. Forța de revenire se datorează tensiunii superficiale, amortizarea fiind atribuită vâscozității lichidului. Destrămarea apare atunci când pentru picătura normalizată (în raport cu raza inițială) distorsiunea picăturii depășește valoarea critică unitară. Rata de creare a picăturilor este:

$$\frac{d}{d_t}m(t) = -3K_{br}m(t), \qquad (1.56)$$

unde m(t) – masa medie a picăturii [TF98], K_{br} – constantă ce depinde de mecanismul de destrămare.

Relația exponențială între raza picăturii, r, înainte de destrămare și după, a, va fi:

$$\frac{r}{\alpha} = e^{-K_{br}t} \tag{1.57}$$

Inițializarea parametrilor picăturii supuse fragmentării [TF98], ia în considerare o viteză de deformare "negativă", pentru a evita destrămarea imediată a ligamentelor inițiale foarte instabile, și pentru a extinde durata de viață a acestora, obținută experimental.

Modelul destrămării prin deformare DDB:

Ibrahim și colaboratorii [ID93] au propus *modelul DDB*, care se bazează pe dinamica picăturii, care ia în considerare mișcarea masei centrului semi-sferei (picăturii). Se presupune că deformarea picăturii în timpul destrămării decurge de la starea ideală a unei forme sferice inițiale (de rază r_o) într-un sferoid aplatizat având o secțiune transversală elipsoidală cu semiaxa mare a și semi-axa mică b. Energia internă din semi-sferă, \dot{E} , (jumătatea picăturii) este compusă din suma energiilor cinetice și potențiale:

$$\dot{E} = \frac{2}{3}\pi r_o^3 \rho_L \dot{y}_1 \ddot{y}_1 + \frac{9\pi^2 \sigma}{8} y_1 \left[1 - 2\left(\frac{cy_1}{r_o}\right)^{-6} \right] \dot{y}_1, \qquad (1.58)$$

unde $c=3\pi/4$ constanta, y_1 - distanța de la central de masa al semi-sferei deformate către polii săi. Se consideră că W reprezintă energia datorată forțelor de presiune și a celor de vâscozitate:

$$\dot{W} = -\frac{\pi}{4} r_o^2 \rho_G U^2 \dot{y}_1 + \frac{8}{3} \pi r_o^3 \mu_L \left(\frac{\dot{y}_1}{y_1}\right)^2.$$
(1.59)

Se notează cu $y_1^* = y_1/r_0$ raportul adimensional care înlocuit în ecuația de mai sus conduce la obținerea ecuației 1.68 și a soluțiilor acesteia.

$$\ddot{y}_{1} + \frac{4N}{\operatorname{Re}\rho_{r}} \frac{1}{y_{1}^{2}} \dot{y}_{1} + \frac{27\pi^{2}}{16We\rho_{r}} y_{1} \Big[1 - 2(cy_{1})^{-6} \Big] = \frac{3}{8\rho_{r}}$$

$$a = 3\pi r_{o} \frac{y_{1}}{4}; b = \frac{r_{o}^{3}}{a^{2}};$$
(1.60)

Cu ρ_r este notat raportul între densitatea aerului și cea a combustibilului, cu N raportul vâscozităților lichid-gaz și cu Re, We numerele *Reynold* și *Weber*.

Modelul DDB este aplicabil regimului de destrămare prin forfecare, care se presupune că începe de la We > 40.

3. Modele combinate de destrămare

Modelul destrămării unificate a jetului USB:

În modelul (Unified Spray Breakup - USB) [CC06, AN11, CC08], destrămarea jetului de pulverizare a fost împărțită în trei sub-procese distincte:

- atomizarea primară,
- deformarea picăturilor din cauza rezistenței aerodinamice,
- atomizarea secundară.

Atomizarea primară este modelată după abordarea Huh și colaboratorii [HK98]. Deformarea picăturii și modelul de atomizare secundară se bazează pe picăturile deja existente, generate de atomizare primară. Atomizarea secundară a fost la rândul său împărțită în patru regimuri [FG95], în baza observațiilor experimentale.

Determinarea regimului de atomizare secundară în acest caz depinde număr de numărul Weber (We) al picăturilor, definit ca:

$$We = \frac{\rho_g U^2 d_o}{\sigma},\tag{1.61}$$

unde ρ_g - densitatea mediului gazos din jurul picăturilor, U - viteza picăturilor de lichid, d_0 - diametrul inițial al picăturii la formare, σ - tensiunea superficială a picăturii.

Pentru numere reduse Weber (mai mici decât 12), atomizarea nu se produce, caz în care are loc numai deformarea picăturii.

Pentru valori mari ale numărului Weber [FG95], există patru regimuri:

-	Destrămare	prin peliculizare	12 <we<20< th=""></we<20<>
-	Destrămare	multiplă	20 <we<80< td=""></we<80<>
-	Destrămare	prin forfecare/rupere	80 <we<800< td=""></we<800<>
-	Destrămare	catastrofică	We>800

În [CC08, CC06], sunt estimate experimental, timpul de fragmentare și dimensiunile picăturilor pentru fiecare regim de rupere. După atomizarea secundară [HL93], picătura ajunge într-o stare stabilă, destrămarea terțiară nemaifiind posibilă. În figura 1.24 se prezintă imaginea destrămării picăturilor după modelele Kelvin-Helmholtz (KH) sau Rayleigh-Taylor (RT).



Fig. 1.19. Modele de destrămare a picăturilor KH-RT, [AN11].

Deoarece vâscozitatea crește, valoarea numărului Weber se mărește și ca urmare, tranziția între regimuri are loc la un număr Weber mai mare, astfel, dezmembrarea picăturilor de lichid are loc într-un ritm mai lent. Acest lucru este ilustrat în figura 1.25, în care sunt prezentate zonele regimurilor de destrămare [FG95], preluată după Chryssakis și Assanis [CC08, CC06].

Regimuri de destrămare



Fig. 1.20. Regimurile de destrămare funcție de numerele Ohnesorge și Weber, [FG95].

Modelul destrămării picăturii și atomizării în cascadă CAB:

Modelul CAB reprezintă o dezvoltare a modelului E-TAB [*TF97*, *TF98*] constând în simularea destrămării unui miez de lichid care părăsește duza injectorului sub forma unor jeturi de înaltă presiune. Destrămarea nucleului de lichid a fost observată experimental de diferiți investigatori [*GÖ88*, *LT96*, *YY01*], folosind tehnici optice și cele bazate pe raze X.

Destrămarea nucleului de lichid este simulată prin injectarea inițială a lichidului care se fragmentează în picături mari, care apoi se sparg în picături mai mici, până când acestea ajung la o stare stabilă.

Destrămarea primară, care constă în apariția primelor picături după injectare, este modelată printr-un fenomen de întârziere a fragmentării inițiale, în conformitate cu corelațiile experimentale. Acest model are la bază oscilațiile picăturii obținute de Taylor.

1.7. Coeficientul aerodinamic al picăturilor de lichid, simularea dinamicii acestora

În figura 1.26 este simulat modul de transformare a picăturii de lichid [AN11], în timpul deformării picăturii pulverizate într-un mediu gazos.



Fig. 1.21. Deformarea picăturii de lichid, [AN11].

În figura 1.27 este simulat procesul de destrămare a jetului lichid în picături de lichid [PP14].



Fig. 1.22. Simularea procesului de atomizare a jetului de lichid, [PP14].

Simularea procesului de atomizare are ca scop validarea rezultatelor obținute cu ajutorul modelelor analitice. Pentru simulări se folosesc ca date de intrare parametrii cunoscuți din efectuarea experimentelor. Ca exemplu amintim unghiul θ al jetului de picături sau constanta destrămării jetului C_{λ} la care valorile adoptate depind de injector și de caracteristicile sistemului de injecție. Se ține seama și de modul cum decurge pulverizarea picăturilor: fără sau cu vaporizare, într-un mediu controlat izobar sau izocor etc. Simulările conduc la rezultate mulțumitoare atât cantitative cât și calitative.

O predicție teoretică a coeficientului aerodinamic [TT64] pentru $R_e < 1$ este dată de Taylor și Acrivos:

$$C_{D} = \frac{8}{R_{e}} \frac{2+3\mu_{r}}{1+\mu_{r}} \left(1 + \frac{R_{e}}{16} \frac{2+3\mu_{r}}{1+\mu_{r}} + \frac{1}{40} \left(\frac{3\mu_{r}+2}{\mu_{r}+1} \right)^{2} \left(\frac{R_{e}}{2} \right)^{2} \ln \frac{R_{e}}{2} \right)$$
(1.62)

Pentru $\mu_r \rightarrow \infty$, coeficientul aerodinamic va fi:

$$C_D = \frac{24}{R_e} \tag{1.63}$$

Pentru $\mu_r \rightarrow 0$, coeficientul aerodinamic este:

$$C_D = \frac{16}{R_e} \tag{1.64}$$

Volumul picăturii nu este influențat, fiind estimat același ca la primul jet de lichid atomizat. De asemenea, putem spune că este un jet izotrop și picăturile nu sunt distorsionate semnificativ de la forma sferică.

1.8. Concluzii. Direcții de cercetare

Studiul documentației privind atomizarea jetului de lichid în picături de combustibil arată că au fost dezvoltate o multitudine de modele, axate în general pe determinarea diametrului picăturilor, a lungimii de penetrare a jetului, a unghiului de evazare a anvelopei, a duratei procesului de vaporizare.

Pentru motoarele dotate cu sisteme de injecție multipunct la care pulverizarea combustibilului are loc prin injecție în colectorul de admisie înaintea supapei nu au fost dezvoltate modele de atomizare specifice acestui caz.

Modelele studiate în bibliografia de specialitate pentru sistemele de injecție multipunct tin cont destul de rar de influența temperaturii mediului gazos în care are loc pulverizarea combustibilului. Fenomenul difuziei termice nu este luat în considerare atunci când se studiază evoluția diametrului picăturii în timp ce aceasta se deplasează într-un mediu gazos.

Pornind de la cele afirmate s-a considerat oportun să fie abordate următoarele *direcții de cercetare*:

- 1. Să se studieze particularităților atomizării jetului de combustibil la sistemele de injecție multipunct și să se determine rezistența aerodinamică și pe cea de deformare a picăturilor de lichid. Este necesar să se determine coeficientului aerodinamic al picăturilor funcție de raportul dintre vâscozitatea combustibilului și cea a aerului. Se va analiza cum decurge fenomenul de atomizare datorat perturbațiilor de suprafață ale jetului de lichid la atomizarea acestuia și variației lungimii de undă funcție de viteza aerului.
- 2. Să se determine prin calcul viteza momentană de vaporizare a picăturilor de lichid injectate într-un mediu gazos cu sau fără luarea în considerare a difuziei termice. Calculele se vor efectua pentru sistemele de injecție multipunct în cazul curgerii jetului de benzină prin colectorul de admisie în condiții izobare, cu şi fără luarea în considerare a difuziei termice. Dezvoltarea unui model matematic pentru studiul procesului de vaporizare a picăturilor de combustibil în condițiile de mai sus atunci când se modifică temperatura mediului gazos. Modelul trebuie să permită determinarea drumului parcurs de picături până când acestea se vaporizează integral. Modelele dezvoltate vor fi validate prin modelarea procesului de atomizare în ANSYS determinând viteza picăturilor de combustibil, starea fluidului de lucru la ieşirea din duza de injecție şi forma conului jetului injectat.
- 3. Adaptarea în Matlab a unui sistem de recunoaștere a imaginilor pentru un jet de combustibil atomizat care să permită prin calcul determinarea parametrilor injecției și să poată stabili statistic caracteristicile procesului.
- 4. Conceperea şi realizarea unui stand experimental care să includă un modul electronic destinat modificării ciclicității şi a duratei injecției la sistemele multipunct de injecție a benzinei. Conceperea şi realizarea unui sistem care să permită filmarea rapidă a jetului de benzină, în cazul variației presiunii furnizate de pompa de alimentare. Stabilirea unei tipologii de determinare a gradului de uzură a injectoarelor folosind profilometria laser. Efectuarea determinărilor experimentale care să permită stabilirea gradului de uzură a injectoarelor de combustibil.
- 5. Captarea de imagini cu jeturi de combustibil pulverizat pentru diferite regimuri de funcționare. Prelucrarea imaginilor cu softul de analiză și recunoaștere în Matlab, analiza și interpretarea rezultatelor urmată de stabilirea unor corecții, dacă este cazul, între gradul de uzură a injectoarelor, procesul de atomizare și algoritmul de injecție.

2. CONTRIBUȚII PRIVIND ATOMIZAREA JETULUI DE LICHID CARE SE DEPLASEAZĂ ÎNTR-UN MEDIU GAZOS

2.1. Introducere

În primul capitol s-a arătat că destrămarea jetului lichid de combustibil începe imediat ce acesta părăsește duza injectorului. Atomizarea combustibilului depinde de mai mulți factori, fiind împărțită în general în atomizare primară și secundară. Evoluția procesului de atomizare depinde de tipul și caracteristice funcționale ale motorului. La motoarele dotate cu sisteme de injecție multipunct picăturile de combustibil întâlnesc aerul din galeria de admisie. Presiunea până în poarta supapei de admisie oscilează în limite mici, la valori apropiate de cele ale mediului ambiant. La sistemele cu injecție directă, pulverizarea combustibilului este total diferită, mediul gazos aflându-se la o presiune ridicată de ordinul zecilor de bari, temperatura și volumul fiind la rândul lor variabile. În continuare se vor face referiri doar la sistemele de injecție a combustibilului multipunct, de tip indirect.

Atomizarea unui jet de lichid într-un curent de gaz de mare viteză poate fi considerată o problemă de flux bifazic caracterizat de mai mulți parametri. O analiză a lui Lasheras și Hopfinger [*LJ00*] descrie mecanismul prin care are loc destrămarea jetului de lichid în picături. Pentru aplicații în domeniul motoarelor cu ardere internă [*LA89, LL09, **GA, JT09*], sunt date corelații empirice pentru determinarea dimensiunii picăturilor de combustibil atomizat în funcție de parametrii de injectare. Cu toate acestea, sunt necesare studii detaliate asupra mecanismului de atomizare care să se materializeze în relații care să stea la baza unor modele aplicabile pe scară largă. Atomizarea unui jet de lichid pulverizat într-un flux de gaz de mare viteză este fundamental diferită de cea care decurge la viteză foarte mică sau într-un mediu stagnant. Când impulsul curentului de gaz 3 (figura 2.1) este de același ordin, sau mai mare decât cel al jetului de lichid 1, atomizarea se realizează [*BR72*] printr-un transfer de energie cinetică dinspre gaz spre lichid. La benzină trebuie ținut seama și de transferul de căldură dintre picătură și mediul gazos în care aceasta se deplasează.



Fig. 2.1. Schema fluxurilor de aer și combustibil la injecția multipunct.

În figura 2.1 s-a notat: F - filtrul de aer, C - compresor, T - turbină, 1 - jetul de combustibil atomizat, 2 - supapa de admisie, 3 – colectorul de admisie cu aer, 4 - injectorul de combustibil. Amestecul aer-combustibil se realizează pe durata admisiei când pistonul creează depresiune și are loc injecția. Cantitatea de aer aspirată este reglată prin modificarea cursei clapetei de accelerație de către un actuator comandat de calculator. Întrucât admisia urmează

evacuării este bine știut că în camera de ardere există gaze reziduale iar nivelul de presiune din aceasta este mai ridicat decât cel din colectorul de admisie. În colectorul de admisie presiunea scăzută este menținută de depresiunea creată la admisia din ceilalți cilindri. În acest caz la debutul injecției combustibilul găsește condițiile menționate. Mai mult, datorită presiunii superioare din cilindru, la deschiderea supapei de admisie o parte din gazele fierbinți din cilindru vor pătrunde în colectorul de admisie. După egalizarea presiunii și debutul admisiei, în cilindru va pătrunde amestecul proaspăt și cel din EGR. Motorul își modifică în permanență momentul injecției. Există două cazuri majore care influențează procesul de atomizare:

1. Injecția combustibilului are loc mai devreme decât momentul optim, caz în care supapa de admisie este închisă și combustibilul se acumulează pe pereții colectorului de admisie și supapă. Totuși, acestea fiind calde și timpul de staționare al amestecului fiind mai mare, apare un fenomen favorabil pentru procesul de vaporizare. Mai mult, odată deschisă supapa, curgerea va antrena benzina acumulată conducând la o a doua vaporizare.

2. Dacă se injectează prea târziu combustibilul față de momentul optim, picăturile au prea puțin timp pentru vaporizare caz în care o mare parte dintre acestea vor subzista în stare lichidă în cilindru. Acest lucru se va materializa printr-un amestec neomogen însă cantitatea de lichid depusă pe pereți și supape este mai mică decât în cazul precedent, datorită antrenării picăturilor de către mediul gazos.

Tinând seama de cele afirmate rezultă că transferul de căldură caracteristic picăturilor de combustibil injectate în galeria de admisie poate avea loc:

1. În volum, pentru cazul în care vaporizarea decurge fără ca picătura să atingă peretele colectorului de admisie, supapele sau cilindrul.

2. Pe suprafete, când picătura după parcurgerea unui traseu scurt printr-un mediu gazos, atinge și se vaporizează pe o suprafață la care schimbul de căldură este tranzitoriu.

În baza literaturii studiate s-a constatat că pentru sistemele de injecție indirectă au fost deduse preponderent expresii empirice pentru atomizare, care cel mai adesea permit determinarea diametrului mediu Sauter (SMD) în funcție de condițiile de injectare. Instabilitatea care apare la interfața dintre fluxul de gaz și cel al picăturilor de lichid [*LS89*, *MA91*, *LS95*, *RL97*] a arătat că există relații care dau lungimea de undă a instabilității ca o funcție de vâscozitatea gazului și raportul densităților. Considerând jetul incipient lichid, dacă are loc o amplificare a undei printr-un efect perturbator, la un moment dat apare un mecanism care va conduce la destrămarea acestuia în mai multe picături. Mecanismul descris, deși studiat poate fi îmbunătățit. Se presupune [*HL92*, *JD99*] că destrămarea este în strânsă dependență de fenomenele aerodinamice descrise prin numărul Weber (relația 2.1) pentru fenomenele de atomizare a picăturii de lichid de viteză U_l într-un flux de gaze de viteză U_g .

$$We = \rho_g \left(\frac{U_g}{U_l}\right)^2 \frac{D_l}{\sigma}.$$
(2.1)

Cu cât ne depărtăm de duza de injecție cu atât se dezvoltă fenomenul de destrămare primară caz în care se distinge o distribuție poli-dispersă a dimensiunilor picăturilor în procesul de atomizare. S-a constatat experimental că pentru o anumită gamă de mărime a picăturilor, există răspunsuri diferite funcție de viteza mediului gazos ce înconjoară jetul de lichid.

După derularea atomizării primare are loc un mecanism de atomizare secundară care explică cum se modifică diametrul picăturilor spre sfârșitul atomizării. S-a constatat că spre sfârșitul procesului de atomizare diferențele de accelerare pentru diferite dimensiuni ale picăturilor conduc la variații mici ale diametrului mediu al picăturilor, fenomen explicat pe seama efectului de "*amestecare convectivă*". Apare deci o componentă a transferului termic de care trebuie ținut seama.

2.2. Atomizarea jetului de lichid la sistemele de injecție multipunct

2.2.1. Modificarea coeficientului de frecare a picăturilor cu mediul gazos funcție de numărul Reynolds

Pentru o picătură de lichid care se deplasează într-un mediu gazos oarecare se pot determina forțele datorate rezistenței aerodinamice la deplasare, cunoscând coeficientul de rezistență aerodinamică și aria secțiunii transversale de curgere, normală la fluxul de lichid. La rândul său aria secțiunii transversale poate fi calculată în baza diametrului maxim al picăturii, pentru diferite ipoteze care țin seama de forma picăturilor. Forma picăturilor care se deplasează într-un mediu gazos este într-o continuă schimbare. În figura 2.2 se pot observa rezultatele obținute de [*Be10*] din care reiese modul în care forma picăturii evoluează în timp.



Fig. 2.2. Deformarea picăturilor în timp pentru diferite diametre, [Be10].

Cazul picăturii în formă de sferă:

Calculul coeficientului de frecare s-a realizat cu ajutorul unui cod de calcul $[BM15^3]$ dezvoltat în Mathcad $[MC^{**}]$, prezentat în Anexa 1. Considerând picătura pulverizată în formă de sferă, s-a calculat coeficientul de frecare C_{f1} cu relația dedusă de Clift și colaboratorii, [CR78]:

$$C_{f1} = \frac{24}{R_e} \left(1 + 0.15 R_e^{0.687} \right) + \frac{0.42}{1 + 4.25 R_e^{-1.16} 10^4}.$$
 (2.2)

În figura 2.3 sunt prezentate rezultatele calculelor efectuate pentru coeficientul de frecare C_{f1} , la valori ale numărul Reynolds $R_e < 3 \cdot 10^5$.



Fig. 2.3. Coeficientul de frecare funcție de numărul Reynolds pentru picătura in formă de sferă.

Cazul picăturii în formă de disc:

Pentru picăturile de lichid în formă de disc, coeficientul de frecare C_{f2} este dedus de Clift și colaboratorii [*CR78*] cu relația:

$$C_{f2} = \frac{64}{\pi R_e} \left(1 + 0.138 R_e^{0.792} \right), \tag{2.3}$$

unde $R_e \in (1, 5 \div 133)$.

Codul pentru modelul matematic de calcul al coeficientului de frecare C_{t2} [BM15³], funcție de numărul Reynolds se găsește în Anexa 1, iar rezultatele obținute au permis obținerea figurii 2.4.



Fig. 2.4. Coeficientul de frecare funcție de numărul Reynolds al picăturii în formă de disc.

Cazul picăturii în formă de sferoid:

Pentru *picăturile de lichid în formă de sferoid*, Clift si colaboratorii [*CR78*, *CC05*] au stabilit pentru coeficientul de frecare, relația:

$$C_{f3} = 108, 42R_e^{\left[-1,66+0,3958\log(Re)-0.03\log^2(Re)\right]},$$
(2.4)

în care $R_e \in (40 \div 10^4)$.
Folosind codul de calcul pentru determinarea coeficientului de frecare C_{f3} funcție de numărul Reynolds menționat $[BM15^3]$, s-a obținut figura 2.5 pentru picătura în formă de sferoid. Codul de calcul este prezentat în Anexa 1.



Fig. 2.5. Coeficientul de frecare al picăturii în formă de sferoid funcție de numărul Reynolds.



Fig. 2.6. Zonele de deformare ale picăturii de lichid funcție de numărul Reynolds.

În figura 2.6 este prezentat modul în care picătura de lichid își schimbă forma funcție de valoarea numărului Reynolds datorită forțelor de rezistență aerodinamică a mediului gazos în care se deplasează. Pe grafic sunt identificate și marcate zonele în care picăturile își schimbă brusc forma, premergător etapei de destrămare.

2.2.2. Determinarea coeficientului aerodinamic al picăturilor funcție de raportul dintre vâscozitatea combustibilului și cea a aerului

Coeficientul aerodinamic al picăturilor care se deplasează într-un mediu gazos, se poate determina cu relația [*CC05*, *CR78*]:

$$C_{D} = \frac{8}{R_{e}} \left(\frac{3\mu_{r} + 2}{\mu_{r} + 1} \right), \tag{2.5}$$

unde μ_r - raportul dintre vâscozitatea dinamică a picăturii și cea a fluxului de aer ($\mu_r = \mu_b/\mu_g$).

Întrucât deplasarea relativă a fluxului de aer față de picăturile de combustibil determină valorile numărului Reynolds, a fost realizat un cod în Mathcad [BM153] prezentat în Anexa 1. Rezultatele obținute au permis trasarea evoluțiile coeficienților aerodinamici ai picăturilor care se deplasează într-un mediu gazos (aer și gaze reziduale la sistemele de injecție multipunct) funcție de raportul vâscozităților dinamice combustibil-aer.



Fig. 2.7. Coeficientul aerodinamic funcție de raportul vâscozităților la picăturile în formă de sferă.

Din figură se remarcă cu ușurință faptul că pentru numere Reynolds care au valori sub 400 coeficientul aerodinamic crește cu atât mai mult cu cât acesta scade. Pentru numere Reynolds cuprinse între $1500 \div 3 \cdot 10^5$ coeficienții aerodinamici au valori sub 0,06.



Fig. 2.8. Coeficientul aerodinamic funcție de raportul vâscozităților la picăturile în formă de disc.

Chiar dacă numărul Reynolds se modifică în limite restrânse $(15 \div 133)$ coeficientul aerodinamic este influențat pe tot domeniul valorilor raportului dintre vâscozitatea picăturii și vâscozitatea fluxului de aer. Pentru calculul coeficientului aerodinamic, în cazul picăturilor la care forma este apropiată de cea a unui sferoid, cu același cod de calcul s-a obținut figura 2.9.



Fig. 2.9. Coeficientul aerodinamic funcție de raportul vâscozităților la picăturile sferoid.

Coeficientul aerodinamic prezintă variații semnificative pentru acest caz (sferoid) dacă Re>180 iar pe restul domeniului ca și la picăturile de formă sferică nu se constată o influență sesizabilă a acestuia. Pentru toate cazurile s-a constatat că o dată cu creșterea raportului vâscozităților dinamice cresc valorile coeficienților aerodinamici.

2.3. Contribuții privind studiul factorilor care influențează atomizarea jetului de lichid într-un mediu gazos

Chiar dacă au fost dezvoltate diferite modele pentru determinarea parametrilor unui fenomen de atomizare s-a constatat în baza literaturii de specialitate studiate că sunt necesare studii suplimentare dedicate injecției multipunct a benzinei. Sunt necesare completări privind mecanismele fizice care stau la baza fenomenului de atomizare iar în baza acestora este necesar să se deducă relațiile de calcul pentru evoluția în timp a dimensiunii picăturilor.

2.3.1. Determinarea perturbațiilor de suprafață a jetului de lichid la atomizarea acestuia

Înainte de a analiza factorii care contribuie la instabilitatea unei interfețe de lichid, se analizează caracteristicilor undelor de suprafață. Când o interfață lichid-gaz este deformată, așa cum se arată în figura 1.16, forțele de tensiune superficială tind să o aducă înapoi la forma sa de echilibru. Starea de echilibru a interfeței este definită în baza tuturor forțelor care pot acționa asupra ei, inclusiv forțele gravitaționale și cele datorate presiunii. S-a constatat că interfața tinde să iasă din starea de echilibru atunci când apare o perturbație asupra undei de propagare. Dacă forțele care acționează pe interfața perturbată sunt tensiunea superficială sau forțele capilare, undele sunt considerate capilare. În figura 2.10 pot fi urmărite elementele unui jet de lichid care se destramă.



Fig. 2.10. Elementele componente ale unui jet de lichid, [ML09].

Undele formate pentru jeturile care constau în mase mari de lichid pot fi influentate de fortele gravitaționale. Prin urmare, acestea sunt considerate unde gravitaționale. Luăm în considerare o undă caracterizată de lungimea de undă λ , frecvență ϖ , și amplitudinea de undă ζ . De asemenea, se ia în considerare viteza caracteristică U pentru lichid. Viteza caracteristică a fluidului ca urmare a mișcării de la interfață poate fi estimată în funcție de amplitudinea perturbării și timpul său caracteristic deci $u \approx \zeta \varpi$. Prin urmare, derivata a doua a vitezei în raport cu spațiul sau Laplacianul vitezei este estimat conform relației $\nabla^2 u \sim U/\lambda^2$ iar derivata vitezei va fi $\partial u / \partial t \sim U \varpi$.

Relația de calcul a lungimii de undă exprimată în µm pentru jetul de lichid pulverizat:

$$\lambda_l = \gamma \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_s} \frac{v_s}{U_s}},\tag{2.6}$$

unde γ - constantă de proporționalitate, λ_l - lungimea de undă a jetului de lichid, ρ_l - densitatea lichidului, ρ_g - densitatea aerului, v_g - vâscozitatea cinematică a gazului, U_g - viteza gazului.

Suprafețele undelor care apar la perturbarea suprafeței jetului lichid care părăsește duza de injecție sunt expuse unui impuls datorat accelerației în curentul de aer. Apare astfel un fenomen denumit instabilitate *Rayleigh-Taylor*, care conduce la apariția unor ondulații caracterizate printr-o lungime de undă caracteristică, notată λ_{RT} . Aceste unde (denumite *Rayleigh-Taylor*) se amplifică, iar ligamentele de lichid de la marginea jetului sunt în cele din urmă destrămate în formă de picături. Pentru a dezvolta acest model, se consideră accelerația undei de lichid *a*, perpendiculară pe suprafața sa, constantă. Analiza clasică a stabilității liniare a problemei Rayleigh-Taylor ia în considerare efectele tensiunii superficiale [*CS61*, *VC01*], pentru rata maximă de creștere, permițând calcularea lungimii de undă cu relația:

$$\lambda_{RT} = 2\pi \sqrt{\frac{3\sigma}{\rho_l a}},\tag{2.7}$$

unde a – accelerația ligamentelor de lichid de la marginea jetului, estimată cu ecuația:

$$a \cong \frac{10\rho_g \left[U_g \left(1 + \sqrt{\rho_g / \rho_l} \right) - U_l \right]^2}{\rho_l \lambda_l}, \qquad (2.8)$$

Lungimea de undă Rayleigh-Taylor este:

$$\lambda_{RT} \cong \frac{3,4\sqrt{\gamma\sigma} \left(\rho_l v_g\right)^{\frac{1}{4}}}{\rho_g^{\frac{3}{4}} \left[U_g \left(1 + \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \right) - U_l \right] U_g^{\frac{1}{4}}},$$
(2.9)

unde U_l - viteza lichidului, σ - tensiunea superficială a lichidului ce formează picătura.

În modelul matematic dezvoltat în Mathcad prezentat în *Anexa* 1, s-au adoptat valorile [conform *Anexa* 2]: viteza gazului $U_g=10\div140$ m/s, viteza ligamentelor lichidului $U_l=1\div8$ m/s, vâscozitatea cinematică a gazului $v_g=15,11\cdot10^{-6}$ m^2/s , densitatea aerului $\rho_g=1,204$ kg/m³ la temperatura de 20°C, densitatea lichidului $\rho_l=720\div775$ kg/m³ (adoptându-se $\rho_l=751$ kg/m³), constanta de proporționalitate $\gamma=0,0577m^{1/2}$, tensiunea superficială a lichidului ce formează picătura $\sigma=0,029$ N/m.

În figura 2.11 s-a reprezentat modul în care se modifică lungimea de undă folosind modelul *Rayleigh-Taylor* în cazul perturbării jetului de lichid în condițiile în care aerul din galeria de admisie prezintă valori diferite ale vitezei.



Fig. 2.11. Variația lungimii de undă λ_{RT} funcție de viteza aerului și viteza ligamentelor

S-a ținut seama și de faptul că viteza ligamentelor se poate modifica. Analizând rezultatele obținute (figura 2.11) se observă că procesul de atomizare se realizează optim la viteze mari ale aerului din canalizația de curgere. Acest fenomen se explică prin faptul că la o viteză a aerului din galeria de admisie de 10m/s corespunde o valoare a lungimii de undă $\lambda_{RT}=5,742\mu m$, iar pentru 40m/s corespunde o valoare a lungimii de undă $\lambda_{RT}=0,334\mu m$. Cu cât lungimea de undă are valori mai mici, cu atât destrămarea lichidului se realizează mai repede. Se poate constata cu ușurință că viteza ligamentelor lichidului devine resimțită cu atât mai mult cu cât valorile sunt mai mari iar viteșa mediului gazos mai mică. Destrămarea jetului este în strânsă dependență atât de modificarea vitezei ligamentelor cât și de cea a mediului gazos.

2.3.2. Variația diametrului mediu Sauter (SMD) al picăturilor de combustibil funcție de viteza aerului

Determinarea *Diametrului Mediu Sauter* (*SMD*) folosind metoda Rayleigh-Taylor, poate fi făcută utilizând relațiile obținute pe seama determinărilor experimentale. Christopher Varga și colaboratorii [*VC01*] propun utilizarea ecuației empirice:

$$SMD \approx \frac{0,68\sqrt{\gamma\sigma} \left(\rho_l v_g\right)^{\frac{1}{4}}}{\rho_g^{\frac{3}{4}} \left[U_g \left(1 + \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \right) - U_l \right] U_g^{\frac{1}{4}}}, \qquad (2.10)$$

Relația dă o dependență a SMD funcție de tensiunea superficială a lichidului ce formează picătura și ia în considerare atât viteza gazului cât și pe cea a ligamentelor. Dacă se utilizează o funcție caracteristică pentru numărul Weber atunci se poate determina raportul dintre SMD și lungimea de undă cu relația:

$$\frac{SMD}{\lambda_l} \cong \frac{0,68}{\sqrt{We_{\lambda_l}}}$$
(2.11)

Pornind de la relațiile prezentate a fost realizat un cod în Mathcad prezentat în Anexa 1.

Rezultatele obținute au permis trasarea figurii 2.12 unde este prezentată variația SMD a picăturilor de combustibil funcție de viteza mediului gazos ținând seama și de modificarea vitezei ligamentelor U_l .



Fig. 2.12. Variația SMD al picăturii funcție de viteza gazului la diferite viteze ale ligamentelor lichidului.

Modelul matematic de calcul a variației SMD pentru picăturile de combustibil ale jetului de lichid atomizat, funcție de viteza aerului, ține seama după cum s-a arătat de viteza ligamentelor considerată a se modifica între limitele $U_l=1 \div 8m/s$. Analizând rezultatele obținute se remarcă faptul că la o creștere semnificativă a vitezei lichidului, apare o descreștere pronunțată a diametrului mediu Sauter (SMD). Acest lucru poate fi explicat pe seama perturbării mai rapide a undelor cât și intensificării transferului convectiv de căldură. Se constată că la valori de peste 28m/s valorile SMD converg către cele mai mici valori. Deci cu cât viteza gazului care înconjoară anvelopa de picături este mai mare, cu atât valoarea diametrului picăturii este mai mică ceea ce se traduce prin creșterea calității procesului de atomizare a combustibilului. Trebuie menționat și faptul că influența vitezei lichidului ligamentelor are o pondere mai scăzută decât cea a aerului.

Atomizarea unui jet de lichid în picături de diametru mic, atunci când acesta este injectat într-un curent de gaz de mare viteză, are loc datorită instabilității de suprafață conform modelului Rayleigh-Taylor. Dimensiunile picăturilor exprimate prin SMD rezultate din calcule bazate pe modelul Rayleigh-Taylor au dovedit că se obțin valori apropiate de ale altor modele, iar dependența diametrului picăturii atât de viteza gazului de pulverizare cât și de tensiunea superficială a lichidului s-a dovedit a fi valabilă.

3. TRANSFERUL DE CĂLDURĂ AL PICĂTURILOR DE COMBUSTIBIL CARE SE DEPLASEAZĂ ÎNTR-UN MEDIU GAZOS

3.1. Transferul de căldură pentru picăturile de lichid injectate într-un mediu gazos fără considerarea difuziei termice

Este necesar ca pentru sistemele de injecție multipunct să se analizeze cum decurge procesul de atomizare pentru un mediu bifazic care constă din două faze nemiscibile în speță picăturile de combustibil și mediul gazos în care acestea evoluează. Fenomenele de transfer termic specifice acestui caz sunt caracterizate prin procese termogazodinamice care diferă fundamental fată de cazul în care fazele se află într-un amestec intim (faza de lichid cu cea de vapori) sau față de cazul când ele se găsesc separate. În general nu se pot preciza cu exactitate granițele separării celor două situații. Ipotezele folosite pentru studiul analitic al curgerii amestecului bifazic cu faza lichidă aflată în suspensie într-un mediu gazos sunt:

- particulele de lichid sunt nedeformabile,
- numărul de picături de lichid din unitatea de cantitate de substanță a mediului bifazic rămâne constant.

Este necesar să se cunoască factorii de influență ai particulei lichide care se deplasează cu o viteză cunoscută într-un mediu gazos. Schimbul de căldură interfazic care are loc între mediul gazos și picăturile de lichid este influențat și de interacțiunea mecanică între cele două faze. Urmărim să determinăm modul de evoluție a parametrilor termofizici ai mediului bifazic în dependență de viteza de curgere a fazei gazoase. Pentru picăturile foarte mici de lichid se poate stabili prin ipoteză că viteza acestora este aproximativ egală cu cea a fazei gazoase. Curgerea unui amestec bifazic este guvernată de relațiile transferului de căldură interfazic, ale lucrului mecanic de frecare dintre faza lichidă și cea de vapori și a acestora cu mediul gazos, ecuația de continuitate, legea conservării energiei, etc.

Considerăm un canal de curgere prezentat în figura 3.1, în care se iau în considerare parametrii mediului bifazic alcătuit din particulele de lichid care se vaporizează în timp ce se deplasează printr-un mediu gazos considerat izotermic, respectându-se ipotezele de mai sus.



Fig. 3.1. Curgerea bifazică printr-un canal de curgere.

Semnificația notațiilor din figura 3.1 este: $A[m^2]$ – aria secțiunilor de intrare ieșire, P[Pa] – presiune, T[K] – temperatură, $\rho_{l,g} [kg/m^3]$ – densitatea fazei lichide și a mediului gazos, $U_{l,g}[m/s]$ – viteza fazei lichide și a cele gazoase.

În figura 3.1 s-a utilizat semnul \pm la parametrii de ieșire din canalul de curgere adică după realizarea amestecului bifazic. Acești parametri depind de temperatura mediului exterior și de presiunea acestuia. De exemplu pe timpul iernii colectorul de admisie va avea o temperatură scăzută care va influența negativ procesul de vaporizare. De asemenea motorul poate funcționa cu sau fără supraalimentare caz în care putem avea depresiune sau suprapresiune în galeria de admisie în care are loc pulverizarea combustibilului. Relațiile care vor fi deduse sunt valabile pentru injecția lichidului în timpul cursei de admisie și începutul compresiei. Ecuația de continuitate pentru cele două faze, lichidă și gazoasă, pentru un debit total al amestecului \dot{m} , va fi:

$$\rho_g A U_g = \dot{m} (1 - x), \tag{3.1}$$

$$\rho_l A U_l = \dot{m} x, \qquad (3.2)$$

unde ρ_o – densitatea fazei gazoase, ρ_l – densitatea fazei lichide, x – participația fazei lichide în unitatea de masă bifazică.

Pentru faza gazoasă putem scrie ecuația de mai jos:

$$P_g = \frac{m_g R_g T_g}{V_g} = \rho_g R_g T_g, \qquad (3.3)$$

unde $P_g[Pa]$ – presiunea fazei gazoase, $R_g[J/kgK]$ – constanta specifică a mediului gazos, $T_g[K]$ – temperatura mediului gazos, $V_g[m^3]$ - volumul.

Dacă înlocuim ρ_g din ecuația (3.1) în ultima relație, se obține:

$$P_g = \frac{\dot{m}(1-x)}{AU_g} R_g T_g.$$
(3.4)

Deoarece între faza gazoasă și cea lichidă în cazul real are loc un schimb de căldură convectiv ne interesează să se determine coeficientului de convecție $\alpha_c [W/m^2K]$ cu ajutorul căruia se poarte determina fluxul termic sau cantitatea de căldură schimbată. Rezolvarea analitică a problemei este anevoioasă și conduce, prin ipotezele simplificatoare care pot fi adoptate, la rezultate care diferă substanțial de determinările experimentale. Din aceste motive se apelează la teoria similitudinii, aplicată schimbului de căldură între particula lichidă în mișcare și mediul gazos ce o înconjoară, utilizând relația de mai jos:

$$Nu_p = 2 + 0,6Re^{0.5}Pr^{0.333}, (3.5)$$

unde Nu_p – numărul Nusselt, Re – numărul Reynolds, Pr – numărul Prandtl.

$$Nu_p = \frac{\alpha_c d_l}{\lambda_f},\tag{3.6}$$

unde α_c – coeficientul de convecție termică, d_l – dimensiunea caracteristică, λ_{fl} – coeficientul de conductivitate termică, obținem relația coeficientului de convecție:

$$\alpha_{c} = \frac{\lambda_{fl}}{d_{l}} \Big(2 + 0,6Re^{0.5}Pr^{0.333} \Big).$$
(3.7)

Exprimăm invarianții de similitudine Re și Pr:

$$Re = \frac{U_{l,g}d_l}{v_l},\tag{3.8}$$

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{v\rho_l c_p}{\lambda_d},\tag{3.9}$$

unde $U_{l,e}$ – viteza relativă a picăturii de lichid față de mediul gazos, d_l – dimensiunea caracteristică a picăturilor de lichid care se deplasează în mediul gazos, v – vâscozitatea cinematică, ρ – densitatea, c_p – căldura specifică la presiune constantă.

Folosind relațiile numerelor Re și Pr, obținem ecuația coeficientului de convecție:

$$\alpha_{c} = \frac{\lambda_{fl}}{d_{l}} \left[2 + 0.6 \left(\frac{U_{l} d_{l} \rho_{l}}{\eta_{l}} \right)^{0.5} \left(\frac{\eta_{l} c_{pl}}{\lambda_{l}} \right)^{0.333} \right], \qquad (3.10)$$

Din expresia coeficientului de conductivitate termică se observă că valoarea maximă a acestuia corespunde picăturilor cu diametru cât mai mic și unor viteze de deplasare cât mai mari. Pentru a obține un schimb de căldură cât mai intens (fenomen dorit la motoarele pe benzină, considerându-se că nu se recomandă prezența picăturilor de lichid pe supape, sediile acestora și în cilindru) o primă condiție necesară este de a se realiza un proces de atomizare care să conducă la o pulverizare cât mai fină a combustibilului. O a doua condiție impune viteze cât mai mari pentru picăturile de lichid.

Căldura schimbată prin convenție în timpul $d\tau$ corespunzător parcurgerii lungimii dx între particulele a căror suprafață exterioară este A_l va fi dată de relația:

$$\alpha_c A_l \left(T_g - T_l \right) d\tau = \dot{m}_l c_{pl} dT_l.$$
(3.11)

Variația temperaturii fazei lichide ca urmare a existenței unui flux termic interfazic va fi:

$$U_l \frac{dT_l}{dx} = -\frac{\alpha_c A_l \left(T_g - T_l\right)}{\dot{m}_l c_{pl}},$$
(3.12)

sau ținând seama de expresia coeficientului mediu de convecție:

$$U_{l} \frac{dT_{l}}{dx} = -\frac{6\lambda_{g}}{\rho_{l} c_{pl} d_{l}^{2}} \Big(2 + 0, 6Re^{0.5} Pr^{0.333}\Big) \Big(T_{g} - T_{l}\Big),$$
(3.13)

Dacă notăm cu y expresia următoare:

$$y = \frac{6\lambda_g}{\rho_l c_{pl} d_l^2} \Big(2 + 0,6Re^{0.5}Pr^{0.333} \Big),$$
(3.14)

ecuația diferențială poate lua următoarele două forme:

$$U_l \frac{dT_l}{dx} = -y \left(T_g - T_l \right), \tag{3.15}$$

$$\frac{dT_l}{\left(T_g - T_l\right)} = -\frac{y}{U_l} dx.$$
(3.16)

Dacă se efectuează integrarea ecuației diferențiale utilizând substituția: $u=T_g$ - T_l rezultă:

$$T_{l(x)} = T_g - k_l e^{\frac{y}{U_l}x},$$
(3.17)

Utilizând condițiile la limită se determinată constanta k_l . Dacă se neglijează modificarea temperaturii fluidului pe traseu până la injector (modificare nesemnificativă de altfel) pentru x=0 atunci $T_l=\dot{T}_l$, unde \dot{T}_l reprezintă temperatura inițială a picăturilor injectate, vom avea:

$$\dot{T}_{l} = T_{g} - k_{l} \Longrightarrow k_{l} = T_{g} - \dot{T}_{li},$$
(3.18)

și atunci soluția ecuației devine:

$$\dot{T}_{l(x)} = T_g - \left(T_g - \dot{T}_l\right) \cdot e^{\left[\frac{6\lambda_g}{\rho_l c_{pl} d_l^2} \cdot \frac{2+0.6Re^{0.5} Pr^{0.333}}{U_l}x\right]}.$$
(3.19)

Relația (3.19) permite calculul temperaturii fazei lichide funcție de spațiul străbătut de picături pentru un mediu bifazic fără a se lua în considerare și fenomenul de difuzie termică care va fi analizat ulterior. Temperatura fazei lichide este influențată de temperatura mediului în care are loc vaporizarea, dimensiunea medie a picăturilor inițiale de lichid, spațiul parcurs

și viteza medie a picăturilor de lichid în mediul gazos. Din relație se observă că dacă x=0 $\dot{T}_{l(x)}=\dot{T}_l$, deci ecuația este verificată. Calculele au fost efectuate ținând cont de caracteristicile termo-fizice ale jetului de benzină pulverizat.

3.2. Transferul de căldură al picăturilor de combustibil injectate într-un mediu gazos considerând fenomenul de difuzie termică

Datorită valorilor diferite ale concentrației de la suprafața picăturii care se vaporizează, respectiv a concentrației la o rază mai mare decât raza picăturii lichide, apare un câmp de concentrație notat d_c / d_r . Luând în considerare difuzia moleculară se consideră că are loc un transfer de masă dat de legea lui Fick:

$$J_{az} = -D_{ab} \frac{d_c}{d_r} , \qquad (3.20)$$

unde J_{a7} [kmol/m²s] – fluxul molar care reprezintă variația masei molare transportate în unitatea de timp prin unitatea de suprafață, normală la direcția de deplasare, D_{ab} [m²/s] – coeficientul de difuzie al substanței A prin substanța B, d_c/d_r – gradientul concentrației.

3.2.1. Determinarea coeficientului de transfer difuziv

Se consideră că variația momentană a masei picăturilor care se vaporizează în timp este dată de raportul masei de lichid ce se vaporizează notat dm_{lv} în timpul elementar $d\tau$, deci:

$$\dot{m}_{\nu} = \frac{dm_{l\nu}}{d\tau}.$$
(3.21)

Dacă se ține seama de expresia cantității de lichid v_{pb} , avem:

$$v_{pb} = \frac{m_{lv}}{M_{b}} \tag{3.22}$$

unde M_b – masa moleculară a lichidului care se vaporizează (benzină). Calculele trebuiesc efectuate ținând seama de influența mișcării asupra vitezei de vaporizare. Pentru aceasta este necesar să se facă o analogie între transferul convectiv de căldură și transferul de masă. Se utilizează relația lui Newton pentru convecția liberă și relația transferului convectiv de masă:

$$\dot{q} = \alpha_c \left(T_2 - T_1 \right), \qquad (3.23)$$

$$\Delta J = \beta (C_1 - C_2) = \beta \frac{(P_1 - P_2)}{RT}, \qquad (3.24)$$

unde $\alpha_c [W/m^2 K]$ – coeficientul de convecție termică, T [K] – temperatura, $\beta [m/s]$ – coeficientul de transfer difuziv.

Pentru calculul coeficientului de transfer difuziv s-a utilizat relația:

$$\beta = \frac{D_{ab}}{D_o} \left[2 + 0.6 \left(\frac{U_{g,l} d_p \rho}{\eta} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\eta}{\rho D_{ab}} \right)^{\frac{1}{3}} \right].$$
(3.25)

Semnificația mărimilor din ecuația de mai sus este cunoscută.

3.2.2. Calculul coeficientului de difuzie termică în cazul injecției combustibilului funcție de variația temperaturii aerului aspirat în motor

Pentru calcularea coeficientului de difuzie termică notat D_{ab} se va aproxima amestecul de gaze reziduale, vapori de benzină și picături de lichid nevaporizate cu un amestec gazos. Se

știe că vaporii au o comportare apropiată de cea a gazelor ideale, singura diferență în cazul de față constituind-o picăturile lichide care au însă o pondere volumică neînsemnată. Hirschfelder, Bird și Spotz în baza teoriei cinetice a gazelor recomandă conform [HW14], următoarea ecuație de calcul:

$$D_{ab} = \frac{1,858 \cdot 10^{-3} T^{\frac{3}{2}} \left(\frac{1}{M_a} + \frac{1}{M_b} \right)^{\frac{1}{2}}}{P_g \sigma_{ab}^2 \Omega},$$
(3.26)

unde D_{ab} $[m^2/s]$ – coeficientul de difuzie termică, T [K]– temperatura mediului gazos în care are loc fenomenul difuziv, M_a , M_b [mol] – masele moleculare ale aerului aspirat și a benzinei $(M_a = 28.96443 \text{ g/mol}; M_b = 115 \text{ g/mol}), P_g$ [Pa] – presiunea aerului aspirat, Ω - integrala de ciocnire - adimensională, σ_{ab} [Å] - diametrul de ciocnire dat de relația:

$$\sigma_{ab} = \frac{\sigma_a + \sigma_b}{2}.$$
(3.27)

Integrala de ciocnire Ω este funcție de temperatură și de potențialul câmpului intermolecular pentru o moleculă din componentul *a* respective *b* (aer, benzină):

$$\Omega = f\left(KT / \varepsilon\right), \tag{3.28}$$

unde K [J/K] – constanta lui Boltzman, ε_{ab} – energia interacțiunii intermoleculare pentru sistemul binar, care se determină la rândul său cu relația:

$$\mathcal{E}_{ab} = \left(\mathcal{E}_a \cdot \mathcal{E}_b\right)^{\frac{1}{2}}.$$
(3.29)

Pentru calcule s-a utilizat un diametru mediu al picăturii adoptat apropiat de cel al determinărilor experimentale considerând că diametrul mediu de ciocnire al picăturilor de benzină atomizată cu moleculele de aer aspirat are valoarea $\sigma_{ab}=44,1\cdot10^{-4}$ Å. Modelul realizat în Mathcad [BM17²], prezentat în Anexa 1, a permis trasarea curbelor din figura 3.2.



Fig. 3.2. Coeficientul de difuzie termică funcție de temperatura mediului gazos luând în considerare presiunea din galeria de admisie.

Coeficientului de difuzie termică crește odată cu temperatura mediului gazos din colectorul de admisie și are valori cu atât mai scăzute cu cât presiunea crește. Influența difuziei termice asupra procesului de atomizare a picăturilor este semnificativă fapt care conduce la modificarea permanentă a formei jetului de combustibil în colectorul de admisie. Presiunea aerului în zona colectorului de admisie se modifică permanent în concordanță cu regimurile de funcționare ale motorului întrucât acesta este controlată de o multitudine de sisteme și mecanisme asistate electronic. Rezultatele din figura 3.2 arată că apar diferențe valorice semnificative ale coeficientului de difuziune termică dacă se modifică presiunea de alimentare din colectorul de admisie.

3.3. Modificarea diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului pe suprafețe

Masa elementară cu care se micșorează picătura de lichid este:

$$d\dot{m}_{pl} = -\rho_a dV. \tag{3.30}$$

iar viteza de vaporizare este:

$$\dot{m}_{pl} = \frac{d\dot{m}_l}{d\tau} = \rho_l \frac{dV}{d\tau} = -\rho_l \frac{d\left(\pi \frac{d_p^3}{6}\right)}{d\tau} = -\rho_l d_p \frac{\pi}{4} \frac{d\left(d_p^2\right)}{d\tau}.$$
(3.31)

Pentru vaporizarea picăturilor de lichid debitul poate fi exprimat sub forma:

$$\dot{m}_{pl} = 4\pi dp \frac{M_b}{RT} D_{ab} \left(P_s - P_{pv} \right) \left(1 + 0,276Re^{\frac{1}{2}} \cdot Sh^{\frac{1}{3}} \right) A.$$
(3.32)

Egalizând cele două relații și efectuând calculele se obține ecuația care stabilește diminuarea diametrului picăturilor de lichid injectate într-un mediu gazos luând în considerare difuzia termică.

$$d_{pic} = \sqrt{d_i^2 - \left[8\frac{M_b}{RT\rho_l}D_{ab}\cdot\Delta p\cdot\frac{1+0,276\left(\frac{U_{pb}d_i\rho_l}{\mu_b}\right)^{\frac{1}{2}}}{\left(\frac{\mu_b}{\rho_l D_{ab}}\right)^{\frac{1}{3}}}\right]t},$$
(3.33)

Semnificația mărimilor din relația dedusă este: d_{pic} [μm] – diametrul picăturii de lichid supusă procesului de vaporizare, d_i [μm] – diametrul inițial al picăturii de combustibil care se deplasează în mediul gazos, $M_b=115[g/mol]$ – masa moleculară a benzinei, R=8314,472 [J/molK] – constanta universală a gazelor, T [K] – temperatura mediului gazos în care sunt pulverizate picăturile de combustibil, D_{ab} [m^2/s] – coeficientul de difuziune termică, U_{pb} [m/s] – viteza picăturii de benzină, ρ_l [kg/m^3] – densitatea lichidului injectat (benzină), μ_b [Pas] – vâscozitatea dinamică a benzinei.

3.3.1. Calculul diametrului picăturilor la vaporizarea combustibilului fără considerarea difuziei termice

S-a conceput un algoritm de calcul în soft-ul Mathcad, care permite determinarea variației diametrului picăturii de lichid atomizat pe timpul vaporizării combustibilului luând în considerare temperatura amestecului din colectorul de admisie. Calculul s-a realizat modificând valorile temperaturii mediului gazos din colectorul de admisie, de la temperatura minimă $T_{g}=250K$ până la temperatura maximă $T_{g}=460K$.

Valorile adoptate se consideră acoperitoare atât pentru timp friguros cât și în cazul încălzirii maxime a colectorului de admisie și implicit a amestecului proaspăt. În figurile de mai jos sunt prezentate rezultatele calculelor.



Fig. 3.3. Variația diametrului d_{pic} în timpul vaporizării combustibilului la $T_g=250K$.



Fig. 3.4. Variația diametrului d_{pic} în timpul vaporizării combustibilului la $T_g=370K$.



Fig. 3.5. Variația diametrului d_{pic} în timpul vaporizării combustibilului la T_g =460K.

Pentru cazul în care s-a calculat variația diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului atunci când nu s-a luat în considerare fenomenul de difuzie termică, timpul de vaporizare a picăturii de combustibil (figura 3.3) pentru temperatura $T_g=250K$ la o viteza de deplasare $W_{pb}=10m/s$ este t=0,0342s. Dacă temperatura crește la

 $T_g=460K$ (figura 3.10) pentru o aceeași viteză de deplasare $W_{pb}=10m/s$ timpul de vaporizare este mult mai mic rezultând din calcule o valoare a acestuia t=0,0186s. Cazul considerat corespunde vitezelor mici de deplasare ale picăturii într-un mediu gazos. Pentru temperatura cea mai scăzută, apare o creștere procentuală a timpului de vaporizare mai mare cu 83,9% față de evoluția picăturii într-un mediu cu temperatură maximă.

Dacă viteza de deplasare a picăturii de lichid în timpul vaporizării este $W_{pb}=80m/s$ (conform Anexa 1), la o temperatură a mediului gazos $T_g=250K$ timpul de vaporizare a picăturii de combustibil este t=0,0121s, iar pentru $T_g=460K$, acesta devine t=0,0066s. Pentru acest caz timpul de vaporizare a picăturii de combustibil într-un mediu cu temperatură joasă ($T_g=250K$) este cu 54,6% mai ridicat față de deplasarea în mediul cu temperatură maximă ($T_g=460K$).

Pentru temperatura medie $T_g=370K$ de funcționare a unui motor cu ardere internă de tip MAS, valoare care corespunde aerului absorbit în motor prin colectorul de admisie la o viteză a picăturii de combustibil $W_{pb}=10m/s$, avem un timp de vaporizare t=0,0251s, în timp ce pentru viteza de deplasare a picăturii $W_{pb}=80m/s$ a rezultat un timp de vaporizare t=0,0088s.

Cea mai mare valoare a timpului de vaporizare este de 0,0342s pentru o viteză de 10m/sși o temperatură a mediului gazos de 250K. Cea mai mică valoare a timpului de vaporizare este de 0,0186s pentru o viteză de 10m/s și o temperatură a mediului gazos de 460K.

Dacă viteza crește la 80m/s și avem o temperatură a amestecului gazos de 250K timpul de vaporizare este 0,0113s iar la 460K acesta este de 0,0062s.

Rezultatele analitice arată că modelul matematic utilizat arată faptul că diametrul picăturii se modifică pe timpul vaporizării în dependență cu viteza de deplasare a picăturii de combustibil și temperatura mediului în care aceasta evoluează. Rezultatele calitative sunt corespunzătoare arătând o diminuare a diametrului picăturii odată cu creșterea temperaturii mediului gazos și a vitezei de deplasare.

Rezultatele cantitative nu sunt pe deplin satisfăcătoare întrucât timpii corespunzători procesului de vaporizare sunt mai mari decât cei obținuți pe cale experimentală de alți autori. Se impune efectuarea unor calcule care să ia în considerare fenomenul de difuzie termică.

3.3.2. Calculul diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului considerând fenomenul de difuzie termică

Pentru efectuarea calculelor s-a dezvoltat un algoritm de calcul utilizând soft-ul Mathcad, cu ajutorul căruia se determină variația diametrului picăturii de combustibil atomizat în timpul vaporizării luând în considerare fenomenul de difuziune termică. Ca și în subcapitolul anterior, calculul timpului necesar de vaporizare s-a realizat cu modificarea valorilor temperaturii mediului gazos în care se deplasează picăturile în colectorul de admisie (conform *Anexa* 1), de la temperatura minimă $T_{g}=250K$ până la temperatura maximă $T_{g}=460K$. Întrucât unul dintre factorii de influență asupra vaporizării este viteza de deplasare relativă dintre picături și mediul gazos, s-au adoptat opt valori ale acesteia care se regăsesc în legenda figurilor de mai jos.



Fig. 3.6. Variația d_{pic} în timpul vaporizării combustibilului la $T_g=250K$.



t [s] Fig. 3.7. Variația d_{pic} în timpul vaporizării combustibilului la $T_g=370K$.



Fig. 3.8. Variația d_{pic} în timpul vaporizării combustibilului la T_g =460K.

Rezultatele obținute pentru procesul de vaporizare a picăturilor de combustibil considerând fenomenul de difuzie termică, arată că timpii de vaporizare a picăturilor de combustibil atomizat sunt mult mai mici față de cei în care acesta se neglijează. În urma calculelor se remarcă faptul că pentru temperatura minimă $T_g=250K$ la o viteza de deplasare a picăturilor $W_{pb}=10m/s$ (figura 3.11) se obține un timp de vaporizare t=0,0206s. Pentru temperatura maximă $T_g=460K$ la o aceeași viteză de deplasare ($W_{pb}=10m/s$) (figura 3.18) apare o scădere a timpului de vaporizare a picăturii de lichid la valoarea t=0,0112s. Diferența procentuală a diminuării timpului de vaporizare este de 83,9%.

Pentru situația în care s-a utilizat în calcule cea mai ridicată valoare a vitezei de deplasare a picăturii de combustibil care se vaporizează în mediul gazos, mai exact $W_{pb}=80m/s$, pentru cea mai scăzută valoare a temperaturii $T_g=250K$ (figura 3.11) a rezultat o valoare a timpului de vaporizare t=0,0071s. Pentru cea mai ridicată valoare a temperaturii $T_g=460K$ la aceeași viteză de deplasare (figura 3.18) s-a obținut un timp de vaporizare a picăturii de combustibil t=0,0040s. Pentru acest caz, diferența procentuală a diminuării timpului de vaporizare este de 77,5%.

Pentru o temperatură medie a mediului gazos (apropiată de cea funcțională) considerată $T_g=370K$, s-a obținut la o viteză a picăturii de combustibil $W_{pb}=10m/s$ (figura 3.15) un timp de vaporizare t=0,0139s, iar la viteza de deplasare a picăturii $W_{pb}=80m/s$ timpul de vaporizare este t=0,0049s.

În baza rezultatelor obținute putem trage concluziile:

- Durata de trecere a picăturii din starea lichidă în cea de vapori este esențială pentru buna funcționare a motoarelor cu ardere internă.
- Durata vaporizării influențează calitatea procesului de ardere. Calculele analitice cu și fără luarea în calcul a difuziei termice arată diferențe cantitative semnificative ale duratei de vaporizare.
- Modelul care ia în considerare fenomenul de difuziune termică asigură rezultate calitative bune întrucât curbele de variație în timp a diametrului picăturilor arată diminuarea acestuia odată cu creșterea temperaturii mediului gazos și a vitezei de deplasare.
- Modelul care ia în considerare difuzia termică oferă rezultate cantitative mai apropiate de determinările experimentale față de cel care neglijează acest fenomen.

Întrucât presiunea din colectorul de admisie influențează temperatura de vaporizare este necesar să se analizeze comportamentul picăturilor pentru acest caz.

3.3.3. Modificarea diametrului picăturilor în timp la diferite presiuni ale mediului gazos, considerând fenomenul de difuzie termică

Calculul diametrului picăturilor de combustibil atomizat la diferite presiuni ale mediului gazos în colectorul de admisie este realizat luând în calcul fenomenul de difuzie termică care apare între moleculele gazului și cele de combustibil în timpul omogenizării amestecului carburant. Difuzia produsă de diferența de concentrație și fenomenul datorat transferului de masă prin difuzie moleculară pot să frâneze sau să intensifice fenomenul de transfer termic prin:

- *difuzia termică*, bazată pe efectul Soret, corespunzător căruia moleculele cu masă mai mare tind să se deplaseze în zonele cu temperatură scăzută;
- *difuzia de presiune*, cauzată de diferența de presiune.

În figurile prezentate mai jos, se găsesc curbele de variație a diametrului picăturilor de combustibil atomizat într-un mediu gazos care are temperatura medie $T_g=370K$ considerată apropiată de temperatura nominală de funcționare a motoarelor care utilizează sisteme de injecție multipunct. Valorile presiunii corespund motoarelor supraalimentate.

Întrucât temperatura de vaporizare crește o dată cu mărirea presiunii este de așteptat ca timpii necesari procesului de vaporizare să crească. Totuși fenomenul de atomizare nu este foarte mult afectat întrucât asupra atomizării apare un factor favorizant dat de accelerarea fărâmițării datorate intensificării curgerii induse de creșterea vitezei relative între deplasarea picăturilor și cea a mediului gazos.



Comparând valorile parametrilor obținuți în figurile prezentate mai sus, pentru temperatura $T_g=370K$, și o presiune a mediului gazos din colectorul de admisie $p_g=0,7\cdot10^5Pa$ la viteza cea mai scăzută a picăturii de combustibil $W_{pb}=10m/s$ s-a obținut un timp de vaporizare t=0,0087s. Pentru aceeași parametri însă la $p_g=2,1\cdot10^5Pa$, timpul de vaporizare rezultat din calcule este t=0,0381s. Analizând valorile obținute se constată că dacă presiunea de supraalimentare este maximă putem spune că apare o creștere de 337,9% a timpului de vaporizare. În calule nu s-a luat în considerare destrămarea datorată procesului de intensificare a amestecării amestecului proaspăt prin efecte aerodinamice.

În situația în care utilizăm în calcul o viteză ridicată de deplasare a picăturii de combustibil $W_{pb}=80m/s$ la temperatura $T_g=370K$, pentru presiunea mediului gazos din colector $p_g=0,7\cdot10^5Pa$ timpul de vaporizare este t=0,0031s, iar la o presiune de $p_g=2,1\cdot10^5Pa$, rezultă un timp de vaporizare t=0,0133s. Comparând valorile obținute în figura 3.19, reiese că prin supraalimentare apare o creștere a timpului de vaporizare cu 329% față de situația alimentării normale.

3.4. Modelarea în ANSYS a procesului de atomizare a jetului de combustibil

În ultimul timp validarea rezultatelor analitice se face prin modelări care simulează fenomenele studiate. Acestea oferă în cele mai multe cazuri rezultate satisfăcătoare. Pentru studiul fenomenului de atomizare a combustibilului la sistemele de injectie multipunct s-a utilizat mediul de programare ANSYS CFX [AN09, AN13]. Simularea jeturilor pulverizate este întâlnită în multe aplicații de precum motoarele cu ardere internă, turbine cu gaze, sistemele de climatizare, rachete, etc.

3.4.1. Modelarea în ANSYS a evoluției în timp a vitezei jetului de picături de combustibil pulverizate într-un mediu gazos

În figurile de mai jos sunt prezentate rezultatele simulărilor unui jet de benzină care se atomizează și parametrii acestuia. Se pot urmări diferențele valorice ale parametrilor fazei lichide corespunzătoare ieșirii combustibilului din duza de injecție și cei ai mediului gazos din jurul jetului respectiv, în diferite perioade de timp.



Fig. 3.11. Jetul de combustibil atomizat și parametrii acestuia după 7,3ms.

Din tabelele obținute prin simulare reiese o diferență mare între viteza picăturilor de lichid și cea a mediului gazos, între începutul și sfârșitul jetului atomizat. Astfel în inima jetului de combustibil viteza maximă admisă, este de 19,390m/s, la periferia jetului valoarea medie a vitezei este de 4,848m/s în timp ce viteza aerului este de 1,212m/s. Scăderea vitezei picăturilor de benzină către periferia jetului este pusă pe seama faptului că pe parcursul atomizării un număr tot mai mare de picături intră în contact cu aerul înconjurător, apărând o frânare a acestora. Acest lucru se explică prin coeficienții de frecare ridicați între moleculele mediului gazos și suprafața picăturilor lichide.

3.4.2. Determinarea formei jetului de combustibil prin simulare în ANSYS

O descriere completă a modului în care se simulează atomizarea combustibilului într-un proces de injecție a benzinei la sistemele de injecție multipunct este prezentată în $[BM14^2]$. În figuri le următoate sunt date cazuri le pentru debutul injecției și momentul dezvoltării acesteia.



Fig. 3.12. Forma jetului de lichid la debutul injecției.



Fig. 3.13. Forma jetului de combustibil pe deplin format.

Dacă la debutul injecției se observă clar faza lichidă lângă duza injectorului la atomizarea completă aceasta dispare. Alte imagini obținute prin simulare pot fi urmărite în *Anexa* 3.

4. CONCEPEREA ȘI REALIZAREA STANDULUI EXPERIMENTAL DESTINAT STUDIULUI ATOMIZĂRII COMBUSTIBILULUI

4.1. Conceperea standului experimental

Deoarece sunt necesare noi cercetări privind injecția și atomizarea combustibilului la sistemele de injecție multipunct în dependență cu gradul de uzură al injectoarelor, a fost conceput și apoi realizat un stand care înglobează două subsisteme.

Primul subsistem include injectoarele și partea mecanică formată din canalele de admisie a aerului considerate până la intrarea în camera de ardere a sistemului de admisie multipunct. Cel de al doilea subsistem include instalația de alimentare cu combustibil de la rezervor până la dispozitivul de formare a jetului de combustibil și sistemul electronic de dozare și asigurare a ciclicității injecției sistemului de injecție multipunct.

La acestea se adaugă echipamentele destinate capturilor foto-video pentru jeturile de combustibil pentru diferite valorile ale setărilor montajului electronic de comandă.

4.2. Descrierea standului experimental pentru studiul atomizării combustibilului

4.2.1. Elementele componente ale standului experimental

În figura 4.1 sunt prezentate părțile componente ale standului experimental conceput pentru asigurarea injecției multipunct, reglării duratei injecției și a ciclicității acesteia cu scopul de a simula diferite regimuri de funcționare.



Fig. 4.1. Schema de principiu a standului experimental.

Calculatorul 1 permite achiziția și prelucrarea datelor de la echipamentele foto-video (ex. cameră de filmat TROUBLE SHOOTER TSHRCS) pentru jeturile de combustibil pulverizate în colectorul de admisie 3 al unui motor RENAULT *TIP E7J700* de *1390cm*³. În chiulasa 4 este fixat regulatorul de presiune 5, manometrele de precizie Bosch notate cu 6 din componența kitului KDJE-K100 și rampa de combustibil 7. Conductele de benzină tur-retur 8 ale sistemului de injecție multipunct asigură alimentarea injectoarelor și returul benzinei de la și către rezervorul de combustibil 9. Presiunea în sistemul de injecție multipunct se realizează cu ajutorul pompei submersibile de benzină 10 iar filtrarea se realizează cu filtrul 11.

În cadrul colectivului de cercetare al Facultății de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management din Universitatea "Ștefan cel Mare" Suceava a fost realizat și implementat montajul electronic de comandă și control a sistemelor de injecție multipunct notat cu 12. Pentru captarea digitală foto-video se utilizează echipamentul USB Digital Microscop 1600X notat cu 13 prevăzut în dotare cu grile de etalonare. Injecția combustibilului se realizează cu ajutorul a patru injectoare electromagnetice notate cu 14.

Imagini ale standului experimental sunt prezentate în figurile de mai jos.



Fig. 4.2. Standul experimental, vedere din față.

În figura 4.3 $[BM15^1]$ cu 1 s-a notat montajul electronic de comandă și control a sistemului de injecție multipunct, cu 2 colectorul de admisie a aerului în motor, 3 reprezintă elementul filtrant al benzinei iar 4 cadrul suport al standului experimental.

Imaginea standului experimental permite vizualizarea injectoarelor sistemului de injecție multipunct, detalii ale elementelor componente și o parte a echipamentelor de achiziție foto-video $[BM15^{1}]$.



Fig. 4.3. Elementele componente ale standului experimental.

Chiulasa prezentată în detaliu în figura de mai jos, are o geometrie complexă care influențează procesul de atomizare secundară în funcție de modul cum asigură curgerea. Din acest motiv, este necesar să se cunoască traseul amestecului proaspăt în aceasta și să se evite distribuția neuniformă.



Fig. 4.4. Imagini a chiulasei motoarelor RENAULT TIP E7J700 de 1390cm³.



Fig. 4.5. Cilindrul motor adaptat capturii imaginilor la injecția multipunct.

În figura de mai sus, cu 1 s-a notat cilindrul modificat prin practicarea a două fante 2 în care s-au amplasat ferestrele de vizitare 3. Chiulasa 4 echipată cu injectorul electromagnetic 5 și supapele 6 cuprinde niște montanți care asigură spațiul necesar captării imaginilor cu microscopul digital USB notat cu 7 dotat cu sursă de iluminare proprie.

4.3. Descrierea aparaturii de cercetare

Determinările experimentale au urmărit:

- 1. Scanarea duzei injectoarelor și stabilirea unei corelații între uzură și durata de utilizare în baza rezultatele obținute prin profilometrie laser.
- 2. Obținerea de imagini pentru jeturi de combustibil furnizate de injectoare puțin uzate sau mult uzate.

4.3.1. Profilometrul cu laser µScan

Acesta folosește prin construcție tehnologie laser fiind dedicat cercetării suprafețelor la nivel microscopic. Profilometrul $\mu Scan$ prezintă o serie de avantaje: preluare și procesarea datelor se realizează pe PC, măsurătorile sunt fără contact cu suprafața investigată, precizie foarte ridicată, scanează suprafețe de până la $250 \times 350mm$ cu grosimi de maxim 80mm.



Fig. 4.6. Sistemul de măsurare µScan NanoFocus, vedere de ansamblu.

4.3.2. Echipamente de captare a imaginilor jetului de combustibil atomizat

O metodă sigură constă în filmări la mare viteză asigurată în cazul determinărilor experimentale de camera *TROUBLESHOOTER* model TSHRCS - T071003X.

În figura următoare poate fi vizualizată în detaliu camera de mare viteză din dotarea Centrului de Cercetare în Inginerie Mecanică Suceava.



Fig. 4.7. Camera de filmat TROUBLESHOOTER TSHRCS.

În cadrul contractului de cercetare *MANSID* a fost achiziționată camera de filmat de mare viteză *Fastec HISPEC 5* prezentată în figura 4.10.



Fig. 4.8. Camera de filmat Fastec HISPEC 5

4.3.3. Camera pentru termoviziune cu IR

Întrucât cercetările urmăresc studiul procesului de vaporizare la atomizarea combustibilului în dependență de gradul de uzură a injectoarelor pentru acuratețea determinărilor este necesar să se cunoască cât mai exact temperatura mediului ambiant și îndeosebi a elementelor ce înconjoară anvelopa de picături. Pentru a obține acest lucru s-a utilizat camera cu termoviziune FLIR X6540SC obținută prin proiectul MANSID.



Fig. 4.9. Camera cu termoviziune FLIR X6540SC.

Pentru efectuarea măsurătorilor rapide s-a apelat la camera de termoviziune FLIR TG165 din dotarea laboratorului de cercetare.



Fig. 4.10. Camera cu termoviziune FLIR TG165.

Camera FLIR TG165 are specificațiile tehnice [***FL*]: senzor imagine termică 80x60 pixeli, sensibilitate imagine termică <150mK, timp de răspuns de 150ms, domeniul de măsurare a temperaturii $-25 \div 380$ °C, USB, card SD.

4.3.4. Kitul KDJE-K 100 BOSCH Jetronic

Pentru măsurarea cu precizie a presiunii de lucru a lichidului din rampa de combustibil s-a utilizat la efectuarea determinărilor experimentale un kit specializat produs de firma Bosch, modelul KDJE-K 100, prezentat schematic în figura de mai jos.



Fig. 4.11. Schema Kitului KDJE-K 100 Jetronic.

4.4. Contribuții aduse la comanda și controlul injectoarelor sistemelor de injecție multipunct

Întrucât ciclicitatea timpilor de deschidere a injectoarelor și durata de menținere sunt extrem de mici a fost necesar să fie conceput și realizat un modul electronic care să asigure funcționarea adecvată a acestora. Folosirea calculatorului propriu de control a injecției de pe un autovehicul ar fi fost mai indicat însă comanda și controlul injecției în acest mod este mult mai dificilă. Realizarea montajului electronic este prezentată în figura de mai jos [$BM16^2$].



Fig. 4.12. Imaginea montajului electronic de comandă a injectoarelor.

4.5. Metodica alegerii injectoarelor în vederea efectuării determinărilor experimentale

Pentru efectuarea determinărilor experimentale au fost alese opt injectoare Bosch care intră în componența sistemelor de injecție multipunct a benzinei fiind împărțite în două seturi de câte patru bucăți. Aceste seturi cu uzuri total diferite au fost demontate în service autorizat de pe două autovehicule care prezentau kilometraje cunoscute.

Injectoarele nu au fost schimbate pe timpul rulajului. Primul set de patru injectoare corespunde unui rulaj de 132.010km, la un autovehicul cu o vechime de șapte ani și nouă luni, la care motorul avea o funcționare în parametri nominali. Aceste injectoare sunt numerotate de la 1÷4, fiind denumite generic ca *injectoare cu funcționare normală cu uzuri scăzute*. Al doilea set de patru injectoare a fost demontat de pe un autoturism cu un rulaj de 297.642km. fiind numerotate de la 5÷8. Injectorul numerotat cu 8 este parțial defect (de natură mecanică) furnizând totuși combustibil. Aceste set de injectoare sunt denumite generic la rândul lor ca *injectoare cu uzuri ridicate*.

Timpii medii de funcționare, notați T_{f} , calculați în ore pentru cele două seturi de injectoare studiate sunt:

- Injectorul cu uzuri scăzute: $132.010 km 7ani şi 9 luni, 17.033,548 km/an, T_{fs}=4.258,387 h;$
- Injectorul cu uzuri ridicate: 297.642km 13ani şi 6luni, $22.047,555km/an, T_{fr}=9.601,355h$.

Utilizând cele două seturi de injectoare au fost efectuate măsurători experimentale cu ajutorul aparaturii și echipamentelor de cercetare din dotare. După obținerea unor imagini ale jeturilor de combustibil atomizate acestea au fost supuse recunoașterii și prelucrării în Mathcad [*MS8b*]. Prelucrarea imaginilor a ținut seama de împărțirea injectoarelor în cele două categorii: *normale cu uzuri scăzute* și *cu uzuri ridicate*.

5. REZULTATE EXPERIMENTALE OBȚINUTE LA ATOMIZAREA JETULUI DE COMBUSTIBIL

5.1. Metodologia de testare a injectoarelor

La efectuarea determinărilor experimentale s-a utilizat presiunea de injecție indicată de producătorul injectoarelor încercate. Regimul de injecție este cel care corespunde punctului dinamic PD indicat de producător (ce corespunde și debitului static Q_s). Deoarece benzina are în componență un amestec de peste treizeci de hidrocarburi, a căror proporție variază în funcție de sursa primară de extracție a țițeiului brut, de condițiile de rafinare, de legislația țării privind conținutul de sulf și de TEP (aditivată cu plumb), etc., proprietățile ei pot să difere radical, în special în privința volatilității, vâscozității și densității.

Pentru încercări se recomandă conform standardelor în vigoare ca temperatura de intrare a combustibilului în injector să fie stabilizată la valoarea $20\pm3^{\circ}C$, iar temperatura corpului injectorului trebuie să fie cea a incintei. Temperatura chiulasei care echipează standul, trebuie să se încadreze în aceeași gamă de valori ca și subansamblul din care face parte. Pentru a verifica temperatura mediului ambiant și pe cea a echipamentelor testate s-a apelat la camerele în IR.

Presiunea de alimentare a injectorului trebuie să fie cea prescrisă pentru condițiile de funcționare pe automobil, cu toleranțe de $\pm 0,1kPa$. Pompa de alimentare cu combustibil în urma măsurătorilor cu trusa BOSCH Jetronic realizează o presiune de 294kPa.

5.2. Stabilirea gradului de uzură a injectoarelor folosind metoda profilometriei laser

O metodă care permite neinvaziv să se determine gradului de uzură a injectoarelor Bosch ale sistemelor de injecție multipunct este profilometria laser. Folosind profilometrul μ Scan Nanofocus [SC16] s-a scanat acul și depunerile de pe duza de injecție pentru fiecare injector, în zona de evacuare a combustibilului (vârful injectorului).

Analizând rezultatele din cele două figuri de mai jos [SC16] se remarcă famput că la injectorul fără uzură înălțimea acului de injecție este de $620\mu m$ iar raza acestuia de $450,64\mu m$ față de doar $460\mu m$ înălțime și o rază de $291,60\mu m$ la cel cu uzură.

Se observă cu ușurință din detaliile figurii respective depunerile din jurul acului injectorului (zona C1, C2) pentru injectorul cu uzură ridicată.



Fig. 5.1. Parametrii obținuți prin profilometrie laser pentru injectorul cu uzuri scăzute.



Fig. 5.2. Parametrii obținuți prin profilometrie laser pentru injectorul cu uzuri ridicate.

5.3. Metodica și scopul efectuării determinărilor experimentale

Conceperea și dezvoltarea unor noi sisteme electronice de comandă a injectoarelor electromagnetice destinate pulverizării benzinei, stau la baza dezvoltării sistemelor de injecție multipunct a motoarelor cu ardere internă. Aceste sisteme au scopul de spori calitatea atomizării benzinei, de a mări perioada de funcționare indiferent de gradul de uzură al injectoarelor. După cum este cunoscut, gradul de poluare al unui motor este în strânsă dependență cu dezvoltarea sistemelor de alimentare cu combustibil a motoarelor cu ardere internă și depinde îndeosebi de modul de realizare a atomizării. Dacă la sistemele de injecție a benzinei se utiliza până nu demult o singură injecție pe ciclu sistemul de presiune lucrând la presiuni relativ scăzute, în prezent se adoptă tot mai frecvent presiuni ridicate cu mai multe injecții pe ciclu.

În acest context se consideră că prezintă interes să se cerceteze influența uzurii injectoarelor asupra procesului de atomizare a combustibilului. Dacă se constată neconformități ale formei jetului sau abateri dimensionale mari ale picăturilor de combustibil atomizate de la valorile normale atunci trebuiesc adoptate măsuri de corijare. Cercetările vor ține seama de numărul de ore de funcționare a injectoarelor. Pentru a atinge aceste deziderate, este necesar să se studieze modul de formare a jetului de combustibil analizându-se fenomenele de atomizare primară și secundară.

Se va analiza impactul uzurii și regimurilor de lucru ale injectoarelor asupra dezvoltării, formării și destrămării picăturilor de lichid pulverizat. Se va stabili dacă efectele nedorite datorate fenomenului de uzură a injectoarelor pot fi contracarate prin intervenția asupra mapelor de injecție din unitatea de control a motorului realizând simulări în *Matlab Simulink*.

Metodica determinărilor experimentale presupune urmarea pașilor:

I. Obținerea de imagini ale jetului atomizat

În această etapă se vor utiliza echipamente foto-video care să permită după prelucrare extragerea unor imagini de mare rezoluție ale jetului de combustibil atomizat. Determinările experimentale vor fi efectuate în baza unei scheme de efectuare a încercărilor care să asigure atingerea regimurilor de funcționare esențiale funcționării sistemului de injecție multipunct. Acest lucru se va realiza practic cu ajutorul modulului electronic de comandă și control montat pe standul experimental.

II. Asigurarea testării la diferite regimuri de funcționare

Modulul electronic, după cum s-a precizat, a fost astfel conceput încât să poată comanda și controla doi parametri de funcționare ai injectoarelor, și anume:

- 1. Intervalul de timp care se scurge între începutul unei injecții și începutul injecției următoare ciclicitatea.
- 2. Intervalul de timp dedicat comenzii de acționare a injectorului timpul de menținere deschis.

Combinarea celor doi parametri menționați fac posibilă simularea funcționării injectoarelor sistemelor de injecție multipunct.

III. Recunoașterea imaginilor în Matlab Simulink

După obținerea imaginilor cu jeturi de combustibil atomizat va urma prelucrarea acestora cu *software-*ul *Matlab Simulink* [MS8b]. Softul va furniza o serie de parametri specifici procesului de atomizare, precizați detaliat în secțiunea dedicată descrierii softului.

IV. Implementarea unor corecții în codul destinat injecției multipunct

Dacă se constată o legătură între gradul de uzură a injectoarelor și neconformitatea parametrilor injecției, vor fi simulate corecții *în Matlab Simulink* pentru sistemele de injecție multipunct, analizând efectele și parametrii rezultați.

Folosind montajul electronic de comandă și control al sistemului de injecție multipunct, cu potențiometrul R_1 sunt prestabilite trei valori ale perioadei de injecție T, iar cu potențiometrul R_2 trei valori pentru reglarea lățimii impulsului Li. Primele valori corespund ciclicității deschiderii injectoarelor iar celelalte variației cantității de combustibil eliberat cât timp injectorul este deschis.

Perioada T, este definită ca intervalul de timp care se scurge între începutul unei injecții și începutul injecției următoare. Pentru experiment s-au stabilit valorile:

 $T_1 = 120ms$ $T_2 = 380ms$

 $T_3 = 640 ms$

Lățimea impulsului Li, *este definită ca intervalul de timp dedicat comenzii de acționare a injectorului*. Pentru experiment s-au stabilit valorile:

 $\mathrm{Li}_1 = 1,5ms$

 $\mathrm{Li}_2 = 7,2ms$

Li₃ =13,0 ms

Folosind reglajele menționate au fost efectuate capturi foto-video urmate de extragerea acestora. Prezentarea unui extras cu imaginile obținute experimental pentru jetul de combustibil atomizat, la sistemele de injecție multipunct, este făcută în *Anexa* 5.

Testarea injectoarelor s-a realizat pentru două cazuri:

- funcționare cu pierderi de presiune în instalație la $P_p=39,2kPa$,
- funcționare la presiunea nominală la $P_i=294,0kPa$.

5.4. Analiza în Matlab a imaginii jetului de combustibil atomizat

Pentru analiza parametrilor și studierea imaginilor obținute prin combinarea celor trei poziții ale setărilor, s-a utilizat soft-ul *Matlab Simulink*, în care s-a implementat un algoritm de recunoaștere a imaginilor adaptat pentru jeturile de combustibil atomizate.

În figura 5.5 se dă ca exemplu o parte din rezultatele rulării codului *Matlab Simulink* observându-se cu ușurință imaginea originală (stânga) și cea recunoscută și prelucrată (dreapta) cât și parametrii calculați $[BM17^{I}]$.



Fig. 5.3. Recunoașterea imaginii și calculul parametrilor jetului atomizat în Matlab Simulink.

5.4.1. Analiza formei jetului la injectorul cu uzuri ridicate testat la presiune scăzută

În figura 5.42 este prezentată evoluția jetului atomizat de benzină în care la injectorul cu uzuri ridicate este aplicată o presiune sub 294kPa, lucru care este similar unor presupuse defecțiuni la pompa de alimentare cu benzină, sau pierderi de presiune pe instalația de alimentare cu combustibil a motorului $[BM16^{1}]$.



F3768-C0046

F3769-C0046

F3770-C0046



Fig. 5.4. Evoluția jetului de combustibil atomizat la injectorul cu uzuri ridicate (de la frame-ul F3768 la F3773), [BM16¹].

În figura 5.43 sunt prezentate imagini ale jetului atomizat de benzină din camera de ardere, la injectorul cu uzuri ridicate, în care se remarcă acumularea combustibilului pe suprafața supapei de admisie $[BM16^1]$.



Fig. 5.5. Evoluția acumulării de combustibil în camera de ardere pentru injectorul cu uzuri ridicate, [BM16¹].

5.4.2. Analiza parametrilor jetului de combustibil atomizat obținuți cu soft-ul Matlab

În tabelele 5.37 și 5.38 sunt cumulați parametrii pentru injectorul care prezintă uzuri scăzute, valori obținute prin rularea codului *Matlab Simulink* de recunoaștere și analiză a imaginilor jetului de combustibil atomizat.

Tab. 5.1. Parametrii jetului atomizat pentru injectorul cu uzuri scăzute, la P_i=294kPa.

Set	N _p	D _{medp}	D _{maxp}	SMD	Ng	D _{medg}	D _{maxg}	Aj
		[µm]	[µm]	[µm]		[µm]	[µm]	$[mm^2]$
T_1Li_1	11	76	120	8	16	79	125	21
T ₁ Li ₂	247	85	276	17	1659	167	5624	341
T ₁ Li ₃	349	112	497	22	1879	243	9585	506
T_2Li_1	37	58	114	8	27	184	857	18
T_2Li_2	246	95	571	16	2535	144	5819	363
T ₂ Li ₃	563	168	3118	18	3337	109	785	528
T_3Li_1	38	58	182	7	48	114	587	26
T_3Li_2	216	80	372	14	3021	128	4960	267
T ₃ Li ₃	813	135	1867	35	6173	95	1705	574

Tab. 5.2. Parametrii jetului atomizat pentru injectorul cu uzuri scăzute, la $P_p=39,2kPa$.

Set	N_p	D _{medp} [µm]	D _{maxp} [µm]	SMD [µm]	N_{g}	D _{medg} [µm]	D _{maxg} [µm]	A _j [mm ²]
T ₁ Li ₁	5	39	57	4	19	53	133	12
T ₁ Li ₂	46	105	397	5	2440	95	2267	265
T ₁ Li ₃	88	123	479	17	3860	92	628	793
T_2Li_1	10	47	105	3	15	58	125	15
T ₂ Li ₂	107	101	390	14	2589	96	2515	262
T ₂ Li ₃	289	91	555	16	3274	97	753	613
T ₃ Li ₁	38	54	180	5	60	150	1079	32
T ₃ Li ₂	160	86	271	17	1971	112	3252	251
T ₃ Li ₃	347	108	561	26	4914	87	718	605

În figura 5.44 se face un studiu comparativ al numărului de picături versus număr goluri funcție de lățimea impulsului și setările modulului electronic de comandă și control.



Fig. 5.6. Comparație între numărul de picături și de goluri funcție de lățimea impulsului la injectorul cu uzuri scăzute.

Curbele obținute au luat în considerare faptul că durata injecției T_i este corelată și cu lățimea impulsului Li_i rezultând setările $T_1(Li_1, Li_2, Li_3)$, $T_2(Li_1, Li_2, Li_3)$ și $T_3(Li_1, Li_2, Li_3)$. Din figură se remarcă o distribuție mult mai uniformă a numărului de picături față de numărul de goluri. În plus se constată că există o legătură între modificarea lățimii impulsului, numărul de picături și de goluri. În tabelele 5.39 și 5.40 sunt cumulați parametrii injectorului care prezintă uzuri ridicate, valori furnizate de soft-ul *Matlab Simulink*.

Tab. 5.3. Parametrii jetului atomizat pentru injectorul cu uzuri ridicate, la $P_i=294kPa$.

Set	N _p	D _{medp}	D _{maxp}	SMD	N_{g}	D _{medg}	D _{maxg}	Aj
		[µm]	[µm]	[µm]		[µm]	[µm]	$[mm^2]$
T_1Li_1	13	61	140	4	32	38	101	22
T ₁ Li ₂	67	107	349	10	1066	103	2426	120
T ₁ Li ₃	300	138	997	19	3667	99	4198	378
T_2Li_1	13	97	218	7	55	69	312	29
T_2Li_2	111	85	319	12	464	161	2660	85
T ₂ Li ₃	516	102	1022	22	4713	110	5045	502
T ₃ Li ₁	18	67	206	3	50	174	1064	54
T ₃ Li ₂	203	83	281	14	912	146	3211	129
T ₃ Li ₃	722	106	645	29	3786	128	5923	486

Tab. 5.4. Parametrii jetului atomizat pentru injectorul cu uzuri ridicate, la $P_p=39,2kPa$.

Set	N_p	D _{medp} [µm]	D _{maxp} [µm]	SMD [µm]	N_{g}	D _{medg} [µm]	D _{maxg} [µm]	A_j [mm ²]
T ₁ Li ₁	19	59	150	4	5	47	81	50
T ₁ Li ₂	64	66	243	7	425	72	230	123
T ₁ Li ₃	88	79	296	12	832	73	434	180
T_2Li_1	20	66	161	5	8	39	72	56
T ₂ Li ₂	66	83	402	10	730	73	451	118
T ₂ Li ₃	105	69	241	11	1229	86	449	385
T ₃ Li ₁	18	69	253	3	42	287	1763	101
T ₃ Li ₂	68	96	263	11	575	73	270	182
T ₃ Li ₃	116	85	344	11	2201	73	431	336

În figura 5.45 se găsesc reprezentările grafice, pentru numărul de picături în comparație cu numărul de goluri, la injectorul cu uzuri ridicate.



Fig. 5.7. Comparație între numărul de picăturilor și de goluri la injectorul cu uzuri ridicate.

În figura 5.70*a-b* folosind datele obținute din codul *Matlab Simulink* s-au trasat curbele pentru numărul de picături obținute cu ajutorul injectorului care prezintă uzuri scăzute și numărul de picături obținute cu ajutorul injectorului cu uzuri ridicate funcție de lățimea impulsului. Reprezentările grafice țin seama și de presiunea de injecție.



a) pentru injectorul cu uzuri scăzute; b) pentru injectorul cu uzuri ridicate; Fig. 5.8. Numărul de picături funcție de lățimea impulsului considerând presiunea de injecție.

Analizând rezultatele experimentale pentru cazul presiunii nominale de 294kPa pentru setările Li_{max} și T₃/L_{1,2,3} se observă din figura 5.70a că s-a obținut un număr maxim de 817 picături la injectorul fără uzură față de doar 727 picături la injectorul cu uzură. Diminuarea numărului de picături în acest caz este de 11%. Totodată se remarcă tendința crescătoare a numărului de picături odată cu mărirea lățimii impulsului, indiferent de gradul de uzură al injectorului. Pentru celelalte două situații, diminuarea numărului de picături este de 6,3% pentru cazul Li_{max} și T₂/L_{1,2,3} și de 15,7% pentru cazul Li_{max} și T₁/L_{1,2,3}.

În cazul în care injectoarele sistemului de injecție multipunct lucrează într-un sistem în care au loc pierderi de presiune sau alimentarea este defectuoasă pentru o presiune de injecție de 39,2kPa numărul maxim de picături este de 352 corespunzător lui Li_{max} şi T₃/L_{1,2,3} apărând o diminuare față de funcționarea la presiune normală de 43,1% ceea ce arată că se produc sub jumătate din numărul picăturilor unui jet normal atomizat chiar dacă injectorul funcționează corect. Pentru injectorul cu uzuri ridicate și pierderi de presiune în sistemul de injecție monopunct numărul cel mai mare de picături este de doar 107 pentru cazul Li_{max} şi T₃/L_{1,2,3} ceea ce arată o diminuare cu 86,9% din numărul picăturilor pentru funcționarea la presiune nominală a injectorului fără uzură și de 85,3% față de cazul injectorului cu uzuri ridicate și presiune nominală. Pentru funcționarea injectorului cu uzură ridicată creșterea numărului de picături în cazul existenței unei căderi de presiune este aproape liniară, valorile maxime oscilând în jurul cifrei 100. Devine clar pentru această situație că procesul de atomizare este total neconform însă trebuie analizată și evoluția diametrului picăturilor pentru aceleași situații.

În figurile următoare sunt reprezentate grafic valorile Diametrului Mediu Sauter (SMD) pentru injectoarele studiate, la fiecare din cele două presiuni de lucru $[BM16^2]$. În figura 5.71 cu ajutorul datelor obținute experimental și a codului *Matlab Simulink* materializate în tabele introduse în Excel s-a reprezentat variația Diametrului Mediu Sauter SMD pentru injectorul cu uzuri scăzute.



Fig. 5.9. Reprezentarea grafică a valorilor SMD, pentru injectorul cu uzuri scăzute. la cele trei valori ale lățimii impulsului Li.



Fig. 5.10. Reprezentarea grafică a valorilor SMD, pentru injectorul cu uzuri ridicate la cele trei valori ale lățimii impulsului Li.

Pentru cazul presiunii nominale de 294kPa folosind rezultatele experimentale obținute din imaginile prelucrate în *Matlab Simulink* se observă pentru cazul Li_{max} și T₃/L_{1,2,3} din figura 5.71 pentru injectoarele cu uzuri scăzute că cele mai mari valori ale SMD sunt de $35\mu m$. Cea mai mare diminuare a SMD de 48,6% are loc pentru reglajul Li_{max} și T₂/L_{1,2,3}. Totodată se remarcă tendința crescătoare a SMD odată cu mărirea lățimii impulsului, indiferent de gradul de uzură al injectorului. În cazul în care injectoarele sistemului de injecție multipunct lucrează într-un sistem în care au loc pierderi de presiune sau alimentarea este defectuoasă pentru o presiune de injecție de 39,2kPa valoarea maximă SMD este de $26\mu m$ corespunzător lui Li_{max} și T₃/L_{1,2,3} apărând o diminuare de 25,7% față de funcționarea la presiune normală.

Pentru injectorul cu uzuri ridicate conform figurii 5.72 în cazul lipsei pierderilor de presiune în sistemul de injecție monopunct cel mai mare SMD este de $29\mu m$ pentru cazul Li_{max} și T₃/L_{1,2,3} ceea ce arată o diminuare cu 17,1% față de injectorului fără uzură. Pentru funcționarea injectorului cu uzură ridicată și pierderi de presiune în sistem, evoluția SMD este variabilă în mijlocul lățimii impulsului și converge către extremități. Calitatea procesului de atomizare este adesea legată de valorile SMD.
6. CORECȚIA PARAMETRILOR LA INJECȚIA MULTIPUNCT FUNCȚIE DE UZURA INJECTOARELOR

Întrucât apar diferențe evidente între numărul de picături și diametrele SMD la injectoarele cu uzuri ridicate față de cele puțin uzate cu atât mai mult cu cât scade presiunea în sistemul de injecție, este necesar să se ia în considerare aceste aspecte. Practic se poate schimba codul sistemului de injecție astfel încât după un anumit prag al orelor de funcționare a motorului acesta să se modifice. Pentru a verifica veridicitatea acestui lucru se vor face simulări în *Matlab Simulink* în care se vor face modificări ale parametrilor în codul destinat sistemelor de injecție multipunct.

6.1. Schema de simulare în Matlab Simulink a funcționării și corecției sistemelor de injecție

Până în stadiul actual au fost dezvoltate diverse modele care simulează comanda și controlul sistemelor de injecție multipunct, accesul la acestea fiind facilitat de existența unei licențe, în cazul de față [*ML***]. Codul utilizat este conceput să mențină la o valoare fixă raportul aer-combustibil indiferent de valorile celorlalți parametri. Schema de simulare funcționează în buclă închisă și include un sistem complex de subsisteme și un controler. O astfel de schemă prezentată în figura 6.1 a fost concepută pentru validarea controlerului prin simulări, înainte de a începe realizarea constructivă.



Sistem de control a combustibilului

Fig. 6.1. Schema bloc de simulare pentru corecția parametrilor injecției multipunct, [ML**].

Modelul utilizat a avut la bază atât relații analitice cât și empirice și a fost conceput pentru studierea fenomenelor dinamice care au loc în galeria de admisie funcție de raportul aer-combustibil. Modelul ține seama și consideră ca parametru de intrare poziția clapetei de accelerație. În codul Matlab raportul aer-combustibil se calculează prin împărțirea debitului masic al aerului (pompat în galeria de admisie) la debitul masic de combustibil. Raportul ideal de amestec (stoechiometric) oferă un bun compromis între putere, economie de combustibil și emisii. Raportul țintă aer-combustibil pentru acest sistem a fost stabilit la valoarea 14,6:1. În mod tipic, un senzor (sonda lambda) determină cantitatea de oxigen rezidual prezentă în gazul de eșapament (EGO). Acest lucru oferă o bună indicație asupra raportului amestecului aer-combustibil sistemul de simulare asigurând feedback printr-un control în buclă închisă.

Dacă senzorul indică un nivel ridicat de oxigen, legea de control mărește doza ciclică de carburant. Când senzorul detectează un amestec bogat în combustibil, care corespunde unui nivel foarte scăzut de oxigen rezidual, controlerul scade rata de carburant.

Modelul care asigură simularea controlului sistemelor de injecție multipunct necesită încărcarea unor date necesare spațiului de lucru. Acestea vor fi memorate în Matlab într-o structură integrată de date. Este necesar să se precizeze că datele încărcate inițial în spațiul de lucru al modelului supus simulării sunt menținute ca date de simulare izolate față de datele din alte modele deschise.

Controlul consumului de carburant bazat pe captarea semnalelor de la senzorii sistemului permite determinarea debitului ciclic de combustibil necesar obținerii unui amestec stoichiometric. Debitul de combustibil raportat la debitul real de aer determină uniformitatea amestecului rezultat, care influențează la rândul său arderea, lucru sesizabil la gazele de eșapament. În figura 6.2 se găsește schema *Matlab Simulink* care permite analiza parametrilor utilizați de sistemul de injecție multipunct și calculează debitul ciclic de combustibil furnizat sistemului de alimentare.



Subsistemul de control a debitului de combustibil

Fig. 6.2. Schema subsistemului necesar controlului debitului de combustibil, [ML**].

Utilizatorul poate dezactiva selectiv fiecare dintre cei patru senzori (unghiul accelerației, viteza, EGO și presiunea absolută a colectorului [MAP]), pentru a simula defecțiuni în sistemul de alimentare. *Matlab Simulink* realizează acest lucru cu ajutorul blocurilor de comutare manuală. În mod similar, utilizatorul poate induce turații ridicate ale motorului. Un alt bloc permite modificarea unghiului clapetei și repetă periodic secvența de date specificată în mască.

Blocul de control a raportului aer-combustibil utilizează semnalele de intrare și semnalele de reacție pentru reglare, cu scopul de obține un raport stoichiometric. Modelul utilizează trei subsisteme pentru implementarea acestei strategii: un bloc de control logic, calculul debitului de aer și a debitului ciclic de combustibil.

În condiții normale de funcționare, modelul estimează debitul de aer și face anumite ajustări pentru a determina debitul optim de combustibil. Feedback-ul de la senzorul de oxigen oferă o ajustare în buclă închisă a estimării pentru a menține raportul ideal al amestecului. În figura 6.3 este prezentată schema care permite în *Matlab Simulink* pe de o parte să se obțină o estimare a debitului de aer vehiculat prin colectorul de admisie și să se realizeze corecții ale acestuia funcție de cerințele sistemului de injecție multipunct.



Estimare debit aer colector admisie și Corecția în buclă închisă

Fig. 6.3. Subsistemul de estimare a debitului de aer și de corecție a acestuia, [ML**].

În figura 6.4 poate fi urmărit un alt subsistem care este înglobat în schema bloc generală acesta fiind destinat analizei fenomenelor de curgere din colectorul de admisie a motorului.

DINAMICA GAZELOR ÎN COLECTORUL DE ADMISIE



Fig. 6.4. Subsistemul destinat dinamicii gazelor în colectorul de admisie, [ML**].

Codul de simulare are înglobat un modul de control logic care este legat la cei patru senzori. Modelul apelează sincron mapele cu date la un interval de eșantionare periodic de 0,01s. Acest lucru permite ca în cazul unor condiții de tranziție către modul stabil să fie testate în timp util. Schema de control logic din figura 6.5 permite vizualizarea componentelor incluse în această subrutină și modul în care sunt realizate conexiunile între subsistemele acesteia.



Fig. 6.5. Modulul destinat controlului logic, [ML**].

Graficele și mapele cu memorarea datelor revin la starea inițială atunci când modelul iese din starea de defectare și de fiecare dată când este restartat.

6.2. Rezultatele corecției parametrilor în Matlab Simulink funcție de uzura injectoarelor

După cum s-a arătat uzura injectoarelor poate influența puternic procesul de atomizare apărând o deteriorare de tip calitativ a acestui proces. Deși după un anumit număr de ore de funcționare este recomandat să se înlocuiască setul de injectoare a sistemelor de injecție, acest lucru nu se întâmplă practic decât rareori. Se propune ca metodă de evitare a acestui lucru introducerea unor corecții în unitățile de control ale sistemelor de injecție. Corecțiile se vor aplica funcție de numărul de ore de funcționare obținut prin aprecierea rulajului efectuat. Întrucât conform cunoștințelor noastre nu există suficiente studii de specialitate care să indice cum să se implementeze practic acest lucru, într-o primă etapă este oportun să se simuleze comportarea sistemului de injecție atunci când modificăm o parte a parametrilor de intrare a schemei de control și comandă destinată sistemelor de injecție a combustibilului. Schemele bloc prezentate permit modificarea parametrilor:

- > viteză unghiulară ax came, în rad/sec,
- > presiune colector admisie, în Pa,
- > diferență presiune clapetă accelerație, în Pa,
- > unghi clapetă accelerație, în grad,
- > viteză unghiulară motor, în rad/sec.

În continuare va fi prezentat un extras al rezultatelor obținute. În figura 6.7 se prezintă modul în care se modifică poziția clapetei de accelerație atunci când se simulează corecția sistemului de injecție multipunct în dependență de uzura injectoarelor. Din figură se observă că în sistem va apare inițial o accelerație urmată de o decelerație. Toate rezultatele care urmează trebuiesc interpretate funcție de semnalul de excitație aferent deschiderii clapetei de accelerație.



Figura 6.8 s-a trasat după rularea codului aferent injecției multipunct în *Matlab Simulink* în baza datelor de inițializare, a mapelor introduse (figura 6.6) și a parametrilor de deschidere a clapetei de accelerație. În figură se observă evoluția presiunii în colectorul de admisie remarcându-se că cea mai ridicată presiune este de $0,87 \cdot 10^5 Pa$, iar cea mai scăzută valoare este de $0,42 \cdot 10^5 Pa$. Evident timpul aferent accelerării și decelerării este de 8s însă apare o ușoară întârziere de 17ms între modificarea presiunii față de poziția clapetei de accelerație. Se observă că spre deosebire de deschiderea și închiderea de tip liniar a clapetei de accelerație, modificarea presiunii decurge după o curbă a unui arc ogival.



Fig. 6.7. Evoluția presiunii în timp la colectorul de admisie.

Cunoașterea parametrilor sistemului de injecție este esențială. Ținând seama de forma semnalului de excitație s-a obținut în figura 6.9 graficul cu modificarea debitului masic de aer prin clapeta de accelerație.



Fig. 6.8. *Modificarea debitului de aer care trece prin clapeta de accelerație.*

Din figură se poate determina debitul maxim de aer ca fiind 23,72g/s în timp ce valoare minimă este de 12,63g/s. Odată ce accelerația se încheie în grafic apare o diminuare mai rapidă a cantității de aer la începutul decelerării, fenomen explicabil prin întârzierea reacției la semnalul de excitație datorită schimbării de semn.

Figura 6.10 permite urmărirea întregii cantități de amestec proaspăt care se deplasează către cilindru.



Fig. 6.9. Debitul masic de amestec proaspăt admis în cilindru.

Chiar dacă s-a adăugat cantitatea de benzină la debitul de aer din colectorul de admisie (mai mică de 14,6 ori față de aer), reprezentarea grafică din figura 6.10 diferă de precedenta doar cantitativ. În figura 6.11 sunt prezentate rezultatele simulării pentru evoluția în timp a debitului masic de combustibil și a raportului dintre masa de aer și cea de combustibil.



Fig. 6.10. Debitul masic de combustibil și raportul aer/combustibil în timp.

În figura 6.12 este dat modul în care s-a aplicat funcția de corecție și rezultatul privind corecția asupra debitului de combustibil obținut prin simulare.



Fig. 6.11. Funcția de corecție și rezultatul acesteia asupra debitului de combustibil.

În figura 6.12 poate fi urmărit modul de evoluție a constantei din lema pompării funcție de presiunea din colectorul de admisie și viteza unghiulară.



Fig. 6.12. Mapa constantelor din lema pompării funcție de viteza unghiulară și presiunea din colectorul de admisie.

O altă mapă 3D care poate fi obținută rulând codul din *Matlab Simulink* pentru sistemele de injecție multipunct este cea care arată în figura 6.14 cum se modifică viteza unghiulară estimată funcție de poziția clapetei de accelerație și de presiunea din colectorul de admisie.



Fig. 6.13. Modificarea vitezei unghiulare cu poziția clapetei de accelerație și presiunea din colectorul de admisie.

Se poate realiza în 3D (fig. 6.14), un raport procentual cu modificarea parametrilor vitezei unghiulare și presiunii din colectorul de admisie cu și fără corecție.



Fig. 6.14. Diferență procentuală corecții viteză unghiulară și presiune colector admisie.

Din figura 6.14 rezultă că cele mai mari diferențe procentuale între parametrii estimați în urma corecțiilor efectuate și cei introduși inițial apar la valorile maxime ale vitezei unghiulare și presiunii din colectorul de admisie.



Fig. 6.15. Rezultatele corecției uzurii injectoarelor asupra raportului masic aer/combustibil.

Introducerea corecțiilor care țin seama de uzura injectoarelor are efect așa după cum rezultă din figura 6.15 întrucât se asigură o creștere a cantității masice de aer/combustibil caz în care crește implicit viteza de curgere relativă dintre picăturile atomizate și aer.

7. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII DE CERCETARE

7.1. Concluzii și contribuții aduse în plan teoretic și experimental

Cap. 1. Stadiul actual privind atomizarea combustibilului la sistemele de injecție multipunct:

Pentru a înțelege mecanismele complexe ale procesului de atomizare la sistemele de injecție multipunct au fost studiate într-o primă etapă cercetările efectuate în domeniu, urmărindu-se cu precădere modelele dezvoltate și implicațiile acestora asupra calității procesului injecției. În baza literaturii studiate s-a făcut o clasificare a proceselor de atomizare pentru diferite lichide și procesele tehnologice utilizate pentru a se pulveriza un jet. Această clasificare a fost urmată de exemplificări ale modurilor în care se poate realiza un proces de atomizare. În figurile 1.3÷1.8 sunt prezentate principiile atomizării cum ar fi cel al unui fluid sub presiune injectat într-un mediu fără curenți de aer, fragmentarea jetului de lichid injectat cu presiune, atomizarea unui jet de lichid în curenți de aer, centrifugal, electrostatic sau cu ultrasunete.

Din literatura de specialitate s-a constatat că procesul de atomizare este împărțit în trei zone. Prima corespunde fenomenelor care au loc în duza injectorului. Fluidul de lucru este un lichid considerat de densitate ridicată. În duză pot să apară bule datorate fenomenului de cavitatie. A doua zonă, cea a atomizării primare începe imediat ce lichidul (cu viteză ridicată) părăsește duza de injecție. În imediata apropiere a duzei se consideră că apar ligamente primare. Datorită ligamentelor și perturbării undei lichidului începe fenomenul de destrămare a jetului prin fenomenul de cavitatie. Lichidul îsi păstrează starea într-o o asa zisă inimă a jetului injectat. Procesul de atomizare se dezvoltă permanent astfel încât pe lângă picăturile primare se dezvoltă și cele secundare datorită fenomenelor de tip aerodinamic. Se consideră că odată finalizat procesul de atomizare primară începe atomizarea secundară. Atomizarea secundară constă în destrămarea picăturilor primare si a inimii jetului în alte picături, este formându-se anvelopa ietului. Atomizare primară caracterizată de amplificarea amplitudinii undei de turbulență indusă ca rezultat al dezintegrării miezului de lichid. Atomizarea secundară este caracterizată de regimul de destrămare prin forfecare si cel denumit catastrofal. Procesul de atomizare este cel mai adesea explicat pe seama fenomenului de instabilitate a undelor datorită perturbării lor.

Întrucât este necesar să se cunoască particularitățile sistemelor de injecție multipunct, în figura 1.9 sunt prezentate schemele de principiu care stau la baza injecției directe și indirecte iar în figura 1.11 este dată o secțiune printr-un injector electromagnetic.

Din punct de vedere al fenomenului de atomizare s-a considerat necesar ca în baza literaturii studiate să se analizeze care sunt particularitățile formării amestecului carburant la sistemele de injecție multipunct față de alte sisteme. O atenție deosebită s-a acordat studierii dinamicii jetului de lichid, a anvelopei și picăturilor în timpul procesului de injecție a combustibilului. În acest context s-a studiat în detaliu câteva aspecte legate de instabilitatea capilară a jeturilor de lichid libere neînecate. Pentru înțelegerea fenomenelor de curgere și de destrămare a jetului de lichid au fost studiate cele mai cunoscute ecuații de bază care caracterizează dinamica jetului. Pentru o înțelegere cât mai deplină a procesului de atomizare s-au studiat care sunt caracteristicile undelor de interfață specifice acestui fenomen și a fost aprofundat procesul de analiză a instabilității capilare a unui jet de lichid nevâscos.

O prezentare integrală a tuturor modelelor dezvoltate până în prezent pentru procesele de atomizare așa după cum s-a afirmat și în lucrare este imposibilă. S-a considerat oportun să se facă o sinteză a celor mai cunoscute modele de atomizare primară și secundară: LISA, TAB și E-TAB, KH-RT, DDB, USB, CAB.

Utilizând modelele matematice dezvoltate de [RW78, AN11, BV68, CR78] se pot formula următoarele concluzii legate de destrămarea jetului:

- 1.1. Un jet lichid supus unui proces de atomizare devine instabil dacă lungimea de undă a acestuia $\lambda > 2\pi R_3$ unde R_3 reprezintă raza jetului neperturbat de lichid. Orice perturbații cu lungimea de undă mai mare decât diametrul jetului face ca acesta să devină instabil. Orice perturbație periodică asupra jetului de lichid care are un număr de undă care satisface condiția $0 < kR_3 < 1$ (unde k este o constantă) face ca jetul de lichid sa fie instabil Perturbațiile care au $kR_3 > 1$ pot conduce la oscilații stabile ale suprafeței jetului. Pentru unde lungi la care $kR_3 < 1$, strangularea capilară este mai puternică decât forța de restabilire a capilarității. Pentru unde scurte cu $kR_3 \ge 1$, forțele de restabilire devin suficient de mari pentru a înfrânge ștrangularea capilară.
- 1.2. Având în vedere că întreg spectrul de perturbații poate fi prezent în jetul de lichid, s-a constatat că cea mai rapidă creștere a perturbațiilor influențează întotdeauna evoluția jetului. Perturbațiile cresc numai pentru acele lungimi de undă la care energia de suprafață scade.
- 1.3. Mecanismul de instabilitate capilară poate fi explicat folosind ecuația (1.33), aceasta luând în considerare raza R_1 a secțiunii transversale a jetului și curbura jetului axial R_2 . Cei doi parametri sunt de semn opus.
- 1.4. Rayleigh s.a. [RW78] au sustinut că pentru fragmentarea în mod natural a unui jet de lichid, destrămarea jetului este provocată de cea mai instabilă undă. Dimensiunea picăturii poate fi estimată în baza celei mai instabile lungimi de undă la λ_{max} =9,016R₃.
- 1.5. În care cazul în care prin ipoteză se presupune că aproximarea liniară este valabilă până la destrămarea jetului, jetul se destramă când amplitudinea perturbației ajunge la valoarea razei jetului de lichid. Se consideră că se formează o picătură de lichid pentru fiecare lungime de undă a perturbațiilor.
- 1.6. Diametrul picăturii notat cu d, poate fi estimat [AN11] prin volumul lichidului corespunzător unei lungimi de undă: $d^3 = 6\lambda_{max}R_3^2 \approx 54R_3^3$ sau $d=3,78R_3=1,89D$, unde D este diametrul secțiunii transversale a jetului (care de regulă se presupune a fi egal cu diametrul orificiului duzei).
- 1.7. Timpul de fragmentare a jetului și lungimea acestuia pot fi estimate în baza ratei maxime de creștere. În conformitate cu ecuația (1.33), se estimează că picăturile sunt distanțate uniform fiind definite prin: $L_p/2\pi R_3 = 1/0,69$ sau $L_p = 9,016R_3 = 4,55D$ unde L_p este distanța dintre picături.

Cap. 2. Contribuții privind atomizarea jetului de lichid care se deplasează într-un mediu gazos:

În acest capitol au fost abordate problematicile specifice atomizării jetului de lichid la sistemele de injecție multipunct fiind aduse contribuții teoretice prin utilizarea unor modele de calcul care să permită dezvoltarea de coduri în Mathcad. Astfel într-o primă etapă s-a determinat rezistența aerodinamică a unei picături de combustibil care se deplasează într-un mediu gazos în ipotezele descrise detaliat în capitol.

Contribuțiile aduse în plan teoretic sunt:

2.1. S-a dezvoltat un cod de calcul în Mathcad (*Anexa* 1) pentru determinarea coeficientului de frecare care apare între suprafața picăturilor în deplasare printr-un mediul gazos luând în considerare numărul Reynolds. Rezultatele obținute au permis trasarea curbelor din figura 2.3. Pentru picăturile de lichid în formă de sferă s-a considerat că $Re \in (100 \div 3 \cdot 10^5)$. Coeficientul de frecare C_f are o tendință crescătoare semnificativă până la pragul corespunzător lui $Re=5,27 \cdot 10^4$ (*Anexa* 1). După această valoare, coeficientul de frecare C_f are o tendință de creștere liniară. În ceea ce privește coeficientul de frecare C_f

corespunzător picăturilor în formă de disc, s-au folosit valorile $Re \in (1, 5 \div 133)$. Forma curbei coeficientului de frecare prezentată în figura 2.4 corespunde ca aspect unei hiperbole neechilibrate. Coeficientul de frecare se diminuează permanent odată cu creșterea numărului Reynolds. Cu ecuația (2.4) s-a calculat coeficientul de frecare pentru picătura în formă de sferoid, prezentarea rezultatelor obținute fiind cea din figura 2.5. Pentru acest caz s-au utilizat valori ale numărului Reynolds $Re \in (40 \div 10^4)$. Din figură observăm o scădere bruscă a coeficientului de frecare pentru valorile minime ale lui Re după care coeficientul de frecare C_f ajunge de la valoarea 0,75 la 0,62. Întrucât forma de sferă și cea de sferoid a picăturilor este apropiată, se observă din figurile 2.3 și 2.5 că variația coeficientul de frecare C_f funcție de numărul Re are aceeași tendință de modificare, obținându-se din calcule valori destul de apropiate.

- 2.2. Tot în Mathcad (Anexa 1) s-a dezvoltat un cod de calcul pentru determinarea coeficientului aerodinamic C_D al picăturilor de combustibil funcție de raportul dintre vâscozitatea dinamică a combustibilului și cea a aerului aspirat în motor. Modelele matematice iau în considerare diferite valori ale numărului Revnolds. În deplasarea lor din starea inițială către cea finală, prin determinări experimentale s-a dovedit că picăturile trec prin diferite forme: sferă, sferoid și disc. Fiecare picătură în funcție de forma s-a este asociată în curgere unui anumit număr Reynolds. Astfel $Re \in (40 \div 10^4)$ pentru picăturile în formă de sferoid, $Re \in (100 \div 3.10^5)$ pentru picăturile în formă de sferă și $Re \in (1,5 \div 133)$ la cele în formă de disc. În cod s-a utilizat ecuația (2.5) obținându-se curbele din figurile 2.7÷2.9. Din grafice a rezultat că la picăturile sferice valorile pentru C_D oscilează între $C_D=0,017 \div 0,237$ ultima valoare corespunzând numărului Re minim. Modificarea coeficientului aerodinamic devine vizibilă pentru Re<1500. La picăturile în formă de disc valorile coeficientului aerodinamic sunt cuprinse în intervalul valoric $C_D=0,167 \div 1,538$. Pentru această categorie de picături deformate s-a obținut cel mai mare coeficient aerodinamic iar variația acestuia devine evidentă pentru Re < 50. Picăturile deformate sub forma unui sferoid au în deplasare un $C_D=0.015 \div 0.583$ modificarea fiind semnificativă pentru Re<180.
- 2.3. Pentru determinarea prin calcul a variației lungimii de undă a perturbațiilor jetului de lichid funcție de viteza aerului aspirat prin orificiile galeriei de admisie, a fost dezvoltat un cod de calcul în Mathcad prezentat în *Anexa* 1. Rezultatele obținute au fost folosite pentru trasarea figurii 2.11. În calcule s-au utilizat mărimi ale vitezei mediului gazos $U_{g}=10$ ÷40m/s. Curbele obținute au fost trasate pentru trei viteze ale ligamentelor de 1,4 și 8m/s. S-a constatat că cea mai mare lungime de undă este de 5,742µm care corespunde vitezei maxime a ligamentelor iar cea mai scăzută valoare este 0,334µm aceasta fiind determinată pentru valoarea minimă a vitezei ligamentelor.
- 2.4. Cu ajutorul unui model matematic al cărui cod este prezentat în Anexa 1, s-a determinat variația diametrului mediu Sauter SMD pentru picăturile de combustibil ale jetului de lichid atomizat. S-a utilizat o aceeași valoare a vitezei mediului gazos, pentru picăturile de lichid utilizându-se valorile minime și maxime a vitezei ligamentelor ($U_l=1m/s$ și $U_l=8m/s$). Rezultatele obținute sunt vizibile în figura 2.12, unde poate fi remarcată și ordinea de mărime a diametrului mediu Sauter SMD funcție de viteza mediului gazos. Cea mai mare valoare pentru SMD și anume de 90,0µm s-a obținut la o viteză a ligamentelor $U_l=8m/s$ pentru $U_g=10m/s$. Pe de altă parte cea mai mică valoare a SMD de 22,5µm corespunde unei viteze a ligamentelor $U_l=1m/s$ la $U_o=10m/s$. Tendința de modificare a SMD este descrescătoare dacă viteza mediului gazos crește atingându-se o valoare minimă de 4,72µm la viteze ale mediului gazos cuprinse între 37÷40m/s. Valorile obținute prin calcule pentru SMD au același grad de mărime cu rezultatele similare din domeniu.

2.5. Destrămarea și atomizarea unui jet de lichid injectat printr-o duză de mici dimensiuni (de ordinul a *1÷2mm* într-un curent de gaz se consideră a avea loc printr-o combinație între instabilitatea de la interfața lichid-gaz și instabilitatea Rayleigh-Taylor. Dimensiunile picăturilor formate în procesul de atomizare primară s-au dovedit a fi în aceeași gamă de mărime cu cele corespunzătoare pentru cea mai instabilă lungime de undă Rayleigh-Taylor.

Cap. 3. Transferul de căldură al picăturilor de combustibil care se deplasează într-un mediu gazos:

Întrucât vaporizarea combustibilului injectat într-un mediu gazos la sistemele de injecție multipunct este puternic influențată de temperatură s-a considerat necesar să se dezvolte modele matematice care să ia în considerare acest lucru. Calculul transferul de căldură pentru picăturile de combustibil supuse unui proces de atomizare a fost completat prin luarea în considerare a difuziei termice.

S-a considerat necesar să se determine viteza momentană de vaporizare a picăturilor de lichid care se atomizează într-un proces cu evoluție difuzivă. Pornind de la cele prezentate considerăm că au fost aduse următoarele *contribuții în plan teoretic*:

- 3.1. A fost dezvoltat un model matematic destinat calculului coeficientului de difuzie termică pentru injecția combustibilului funcție de variația temperaturii mediului gazos din colectorul de admisie. Model matematic al cărui cod este dat în Anexa 1, a permis trasarea figurii 3.2. După cum se poate observa din figură, coeficientul de difuzie termică crește o dată cu mărirea temperaturii mediului gazos T_g în care picătura se deplasează, difuzează și se vaporizează. Dacă cea mai mică valoare a coeficientul de difuzie termică este D_{ab}=5,37·10⁻⁹ m²/s corespunzător temperaturii T_g=250K se constată că se atinge valoarea D_{ab}=7,059·10⁻⁹m²/s pentru T_g=300K. Valorile menționate au fost calculate pentru o presiune a mediului gazos p_g=70kPa. Pentru cazul MAS dotate cu turbocompresoare, la presiuni mai ridicate ale mediului gazos (Anexa 1 și figura 3.2), la o valoare p_g=170kPa a rezultat o creștere a coeficientul de difuzie termică de la D_{ab}=1,025·10⁻⁸m²/s pentru T_g=250K, până la D_{ab}=1,348·10⁻⁸m²/s pentru Tg=300K.
 3.2. Dacă fenomenul difuziei termice este luat în considerare din calcule rezultă că avem o
- 3.2. Dacă fenomenul difuziei termice este luat în considerare din calcule rezultă că avem o mai buna atomizare a benzinei într-un timp mai scurt. Afirmația are la bază compararea rezultatelor cu cele similare din domeniu. Întrucât calculele țin seama și de presiune mediului gazos p_g din colectorul de admisie a rezultat că aceasta are o influență mai mică asupra coeficientului de difuzie termică decât temperatura T_g . S-a constatat că apare o creștere proporțională a coeficientului de difuzie termică odată cu mărirea temperaturii T_g , lucru vizibil în figura 3.2.
- 3.3. Modificarea diametrului picăturilor de lichid la vaporizarea combustibilului în volumul unui mediu gazos este caracterizată de ecuații care permit calculul vitezei de variație momentane a diametrului picăturii de lichid. Au fost puse bazele calculelor necesare determinării diametrului picăturilor de lichid în timpul vaporizării combustibilului pe suprafețe obținându-se ecuația (3.37).
- 3.4. Au fost aduse contribuții pentru determinarea evoluției diametrului picăturilor în cazul deplasării acestora într-un mediu gazos neizoterm pentru situațiile:
 - transfer de căldură nedifuziv,
 - transfer de căldură nedifuziv, regim tranzitoriu, considerând un gradient al temperaturii și vitezei mediului gazos, la o presiune constantă în colectorul de admisie,
 - transfer de căldură nedifuziv, regim tranzitoriu, considerând un gradient al presiunii și vitezei mediului gazos, la o temperatură constantă în colectorul de admisie.

Rezultatele obținute în codul Mathcad din *Anexa* 1 a permis trasarea figurilor 3.3÷3.26 care permit studierea modificării diametrului picăturilor în situațiile menționate. Aprecieri cantitative și calitative asupra rezultatelor obținute sunt prezentate în lucrare.

- 3.5. Contribuțiile aduse în modelarea analitică a variației diametrului unei picături lichide care se deplasează într-un mediu neizoterm în regim tranzitoriu arată că se poate determina precis timpul după care are loc vaporizarea completă a picăturii. Valorile obținute indică faptul că odată cu creșterea vitezei de deplasare și a temperaturii mediului gazos timpul de vaporizare scade. Dacă crește presiunea mediului gazos datorită supra-alimentării apare o creștere semnificativă a duratei de vaporizare a picăturilor. În acest caz este recomandat să se facă noi studii analitice întrucât apare un puternic fenomen de destrămare a picăturilor datorat fenomenelor aerodinamice. Trebuiesc efectuate calcule care să îmbine modelele termice cu cele care iau în considerare aspectele aerodinamice.
- 3.6. Modelele care iau în considerare aspectul difuziv indică faptul că se obțin timpi de vaporizare mult mai apropiați de cei ai măsurătorile experimentale față de cazul neglijării difuziei termice. Aceste modele aduc un plus în evaluarea cantitativă.
- 3.7. S-a realizat modelarea în ANSYS a evoluției în timp a picăturile de combustibil atomizat într-un mediu gazos determinându-se o serie de parametri și forme ale jetului. Rezultatele modelării sunt date în figura 3.27 și în *Anexa* 3. În figura 3.27 se poate vizualiza atât forma jetului cât și o parte a parametrilor calculați. După cum se observă din figură, viteza maximă a amestecului atinge 19m/s valoare apropiată de cele obținute prin calcule analitice. În figurile 3.28÷3.31 pot fi urmărite secvențe de lucru folosind mediul de programare ANSYS fiind date exemple cu valorile care pot fi obținute prin simulare. Figurile 3.32, 3.33 și *Anexa* 3, permit vizualizarea formei jetului și a stării de agregare a componentelor acestuia. Trebuie menționat că modul în care se realizează modelarea, introducerea proprietăților fizico-chimice ale mediului gazos și benzinei, a tensiunilor superficiale, a coeficienților de frecare etc. este prezentat pe larg în [BM14²].

Cap. 4. Conceperea și realizarea standului experimental destinat studiului atomizării combustibilului:

Pentru a realiza determinările experimentate a fost proiectat și realizat un stand prezentat în figurile 4.3 și 4.4, care să permită:

- reglarea regimurilor de injecție din dotarea sistemelor de injecție multipunct,
- monitorizarea parametrilor mediului ambiant și a temperaturii elementelor din componența standului,
- vizualizarea jetului atomizat,
- captarea imaginilor.

Au fost aduse următoarele contribuții în realizarea standului:

- 4.1. Au fost achiziționate elementele necesare studierii jetului atomizat de combustibil cum ar fi chiulasa, injectoarele și cilinsdrii unui motor Renault *TIP E7J700* de *1390cm³*. S-au realizat două fante situate echidistant pe circumferința corpului cilindrului motor (poziția 8 în figura 4.4) care fac posibilă filmarea și fotografierea picăturilor de combustibil ajunse în camera de ardere și cilindru. Aceste orificii sunt vizibile și în figura 4.7. S-a adaptat sistemul de injecție multipunct astfel încât cu ajutorul unei truse Bosch KDJE-K 100 Jetronic să se poată monitoriza presiunea în rampa comună. A fost realizat sistemul de alimentare și injecție multipunct a combustibilului.
- 4.2. A fost adaptat un montaj electronic de comandă și control pentru sistemul de injecție multipunct, notat cu 12 în figura 4.1 și prezentat pe larg în figura 4.14. Montajul electronic are ca scop posibilitate de a selecta mărimea parametrilor de funcționare a

injectoarelor în timpul efectuării testelor și anume lungimea impulsului Li[ms] și perioada de timp T[ms].

- 4.3. A fost stabilită o metodologie care să permită simularea pierderilor în sistemul de alimentare datorate uzurii injectoarelor de natură mecanică (prin frecare) și chimică (coroziuni și depuneri).
- 4.4. S-a utilizat o aparatură de cercetare care include efectuarea de măsurători prin profilometrie cu laser (figura 4.8), camere de filmat la mare viteză (figurile 4.10 și 4.11), și camere cu termoviziune cu IR (figurile 4.12 și 4.13).
- 4.5. S-a propus o metodică de alegere a injectoarelor în vederea efectuării determinărilor experimentale care permite determinarea numărului de ore de funcționare notat cu T_f printr-un procedeu de corelare a datelor din exploatare. S-au obținut timpii de funcționare:

- pentru injectorul cu uzuri scăzute: $T_{fs} = 4.258,387 h$;

unde: T_{fs} = timpul de funcționare a injectorului cu uzuri scăzute;

- pentru injectorul cu uzuri ridicate: $T_{fr} = 9.601,355 h$;

unde: T_{fr} = timpul de funcționare a injectorului cu uzuri ridicate.

Cap. 5. Rezultate experimentale obținute la atomizarea jetului de combustibil

După stabilirea unei metodologii de testare a injectoarelor alese, s-a hotărât ca temperatura principalelor componente din sistem (chiulasa, galeria de admisie, injectorul, chiar și combustibilul utilizat) să se încadreze în gama $22\pm3^{\circ}C$, lucru realizat cu ajutorul unei instalatii climatizare portabile. Vizualizarea rezultatelor verificării de temperaturii componentelor standului poate fi făcută în figura 5.1. S-a considerat că presiunea de alimentare a injectorului trebuie să fie cea prescrisă pentru condițiile de funcționare pe automobil și anume de 294kPa, valoarea verificându-se așa după cum rezultă din figura 5.2. Utilizarea parametrilor de reglare ai injectoarelor, obtinuti cu ajutorul modulului electronic de comandă permit modificarea lungimii impulsului Li [ms] și perioadei de timp T [ms], după cum urmează:

Lățimea impulsului Li, definită ca intervalul de timp dedicat comenzii de acționare a injectorului se obține acționând potențiometrul R_2 . Pentru poziția de minim, mediu și maxim, s-au utilizat:

 $Li_1 = 1,5ms; Li_2 = 7.2 ms; Li_3 = 13,0ms;$

Perioada T, definită ca intervalul de timp care se scurge între începutul unei injecții și începutul injecției următoare se reglează cu potențiometrul R_1 . Pentru poziția de minim, mediu și maxim, s-au utilizat:

 $T_1 = 120ms$; $T_2 = 380ms$; $T_3 = 640ms$;

Au fost aduse contribuții în plan experimental prin:

- 5.1. Determinarea gradului de uzură a acului injectorului și duzei de injecție folosind profilometria laser, figurile 5.2 și 5.3 respectiv Anexa 4.
- 5.2. Efectuarea de filmări și fotografieri la rezoluție ridicată ale jetului de benzină atomizat, pentru reglajele ale modulului electronic sus menționate. Imagini ale acestor capturi sunt prezentate în extras în *Anexa 5*.
- 5.3. Recunoașterea cu un cod Matlab Simulink a imaginilor unui jet de combustibil atomizat, figurile 5.4 și 5.5 inclusiv prelucrarea datelor, determinându-se următorii parametri:
 - Numărul de picături de combustibil N_p .
 - Diametrul mediu al picăturii de combustibil D_{medp} [μm].
 - Diametrul maxim al picăturii de combustibil D_{maxp} [μm].
 - Diametrul mediu Sauter SMD [μm].

- Numărul de goluri (spații libere) din jetul de combustibil N_g .
- Diametrul mediu al golurilor (spații libere) din jetul de combustibil D_{medg} [μm].
- Diametrul maxim al golurilor (spații libere) din jetul de combustibil D_{maxg} [μm].
- Aria jetului de combustibil $A_j [mm^2]$.
- 5.4. A fost făcută o centralizare și o interpretare a datelor obținute experimental. Astfel în figurile 5.6÷5.41 s-a reprezentat jetul atomizat și imaginile obținute prin recunoaștere în Matlab Simulink pentru presiunile de injecție $P_i=294kPa$ și $P_p=39,2kPa$ luând în considerare diferite combinații ale setărilor pentru T_i și L_i . În figurile 5.42÷5.69 s-a trasat distribuția suprafeței picăturilor funcție de numărul asociat picăturii pentru diferite perioade ale lui T_i . În tabelele 5.1÷5.36 sunt date valorile extrase din Matlab Simulink pentru diferite valori ale lui T_i și L_i pentru presiunile de injecție $P_i=294kPa$ și $P_p=39,2kPa$. Tabelul 5.37 cumulează parametrii obținuți pentru imagini ale jeturilor de combustibil atomizat pentru injectorul cu uzuri scăzute la presiunea $P_i=294kPa$, iar tabelul 5.38 cumulează parametrii aceluiași injector testat la o presiune cu pierderi în sistem considerată a fi $P_p=39,2kPa$. Tabelul 5.39 cumulează parametrii obținuți pentru imagini ale jeturilor de combustibil atomizat pentru injectorul cu uzuri ridicate la presiunea combustibilului în sistem $P_i=294kPa$, iar tabelul 5.40 cumulează parametrii aceluiași injector testat la o presiune cu pierderi în sistem considerată a fi $P_p=39,2kPa$. S-a făcut o comparație între formele curbelor din graficele trasate în figurile 5.51 și 5.52, a injectorului cu uzuri scăzute față de cel cu uzuri ridicate. Influența presiunii scăzute $P_p=39,2kPa$ a combustibilului în sistemul de injecție multipunct, este resimțită la injectoare care prezintă uzuri ridicate. Acest lucru este observat din diferența valorilor maxime ale lui Ng setarea T3Li3 la jeturile injectorului cu uzuri ridicate (2201 goluri) față de N_g setarea T₃Li₃ la jeturile injectorului cu uzuri scăzute (4914 goluri). A rezultat cu 55,2% mai puține spații libere datorate golurilor, la injectorul cu uzuri scăzute. Dacă discutăm de procentul mediu al N_g la toate setările, rezultă cu 63,5% mai puține spații libere la injectorul cu fără uzură. Referitor la numărul de picături N_p calculat pentru fiecare jet de combustibil atomizat s-a constatat că la presiune scăzută când $P_p=39,2kPa$ pentru toate setările, avem o valoare medie calculată cu 73% mai mare pentru injectorul fără uzură. La presiuni nominale de funcționare (P=294kPa), diferență numărului de
- 5.5. Specific echipamentelor de injecție multipunct a benzinei este corelarea permanentă a debitului de benzină cu debitul de aer la toate regimurile de funcționare. Aceasta impune comanda simultană a elementului de reglare a debitului de benzină și a obturatorului (clapeta de accelerației a sistemului de admisie a aerului). Studiul procesului de atomizare în dependență de uzura injectoarelor și eventualele pierderi de presiune din sistem, arată o diminuare a numărului de picături și modificarea diametrelor pentru aceste cazuri. S-a propus să facă o corecție a parametrilor sistemului de injecție.

picături este cu 29,6% mai mare pentru injectorul fără uzură.

Cap. 6. Corecția parametrilor la injecția multipunct funcție de uzura injectoarelor: Pentru a se realiza corecții ale unității centrale de procesare a datelor de injecție s-a apelat la o schemă de simulare în *Matlab Simulink* [ML**] prezentată în figura 6.1. În figurile 6.1÷ 6.5 sunt prezentate elementele subsistemelor care permit efectuarea de corecții, cum ar fi schema subsistemului controlului debitului de combustibil, de estimare a debitului de aer, dinamicii gazelor în colectorul de admisie, controlului logic.

Au fost aduse contribuții în simularea corecției unui sistem de injecție multipunct prin:

6.1. Modificarea datelor de intrare a subrutinei codului sistemului de injecție, a debitului de aer și a presiunii care trece prin colectorul de admisie.

- 6.2. S-a utilizat o funcție de corecție și s-au vizualizat rezultatele simulării făcute în Matlab Simulink.
- 6.3. Au fost trasate grafice 3D pentru:
 - mapa constantelor din lema pompării funcție de viteza unghiulară și presiunea din colectorul de admisie,
 - modificarea vitezei unghiulare cu poziția clapetei de accelerație și presiunea din colectorul de admisie,
 - modificarea poziției estimate a clapetei de accelerație cu viteza unghiulară și presiunea din colectorul de admisie,
 - diferența procentuală între corecțiile vitezei unghiulare și presiunii din colectorul de admisie.
- 6.4. Au fost trasate în figura 6.17 rezultatele obținute în urma corecțiilor efectuate ținând seama de uzura injectoarelor putându-se urmări în acest caz raportul masic între aer și combustibil.

7.2. Impactul cercetărilor asupra sistemelor de injecție multipunct

Echipamentele de injecție cu comandă electronică s-au dezvoltat din sistemele de injecție mecanică, la care s-au înlocuit injectoarele mecanice cu cele electromagnetice. Pentru a realiza comanda și controlul eficient al acestora s-au introdus diferite sisteme senzoriale și unități electronice de comandă a deschiderii injectoarelor și de reglare a duratei deschiderii acestora.

În urma cercetărilor efectuate s-a concluzionat că sistemele de injecție multipunct, necesită dincolo de avantajele evidente o serie de îmbunătățiri:

- 7.1. Creșterea fiabilității pompelor de benzină, a injectoarelor și eliminarea pierderilor de presiune de pe traseu.
- 7.2. Asigurarea și reglarea debitului ciclic de combustibil în funcție de parametrii motorului să se facă astfel încât să se asigure dozaje optime indiferent de gradul de uzură a injectoarelor.
- 7.3. Atomizarea combustibilului după injectare arată diferențe semnificative ale SMD la anumite regimuri de funcționare. Este necesar să se adopte măsuri care să elimine valorile mari ale SMD acționând asupra parametrilor de injecție și a debitului de aer.
- 7.4. Folosirea acumulatoarelor de presiune (rampe de combustibil) în structura circuitelor de alimentare ale pompelor de injecție a benzinei a înlăturat unele fenomene perturbatoare în funcționarea sisteme de injecție.
- 7.5. Specific echipamentelor de injecție a benzinei este corelarea permanentă a debitului de benzină cu debitul de aer la toate regimurile de funcționare. Acesta impune comanda simultană a elementului de reglare a debitului de benzină și a obturatorului, ceea ce complică construcția instalației de alimentare. Sunt necesare corecții ale acestor parametri odată cu creșterea duratei de utilizare a injectoarelor.
- 7.6. Corecțiile aplicate sistemelor de injecție multipunct pot conduce la reducerea consumului de combustibil (prin mai buna formare a amestecului de combustibil atomizat cu aerul absorbit în motor și a arderii mai eficiente) cât și la reducerea noxelor.

7.3. Direcții de cercetare

Cercetările efectuate ne dau posibilitatea de a enumera câteva direcții viitoare de cercetare și de dezvoltare a sistemelor injecție multipunct care echipează motoarele MAS:

- 7.1. Studierea mai aprofundată a modului de obținere a amestecurilor omogene (sau parțial omogene) și implicit a consumului de combustibil care să se materializeze în asigurarea gradului de poluare cerut, funcție de durata de utilizare a echipamentului de injecție.
- 7.2. Efectuarea unori modelări ale procesului de atomizare în care să se determine prin calcule durata de vaporizare prin îmbinarea modelelor termice cu cele care iau în considerare și aspectele aerodinamice. Se vor studia în acest caz condițiile care conduc la destrămarea picăturilor în cazul supra-alimentării motorului.
- 7.3. Dezvoltarea și implementarea pe motoare a unor soluții privind sistemele de comandă și controlul a injectoarelor care prezintă uzuri ridicate, asigurându-se anumite corecții ale parametrilor unității de control a injecției. În final după implementarea corecțiilor este necesar să se obțină doze ciclice uniforme pentru fiecare cilindru indiferent de regimul de lucru.
- 7.4. Continuarea studiilor de modelare a diferitelor tipuri de jeturi de combustibil în funcție de gradul de uzură a injectoarelor.
- 7.5. Îmbunătățirea schemei de recunoaștere a imaginilor jeturilor de combustibil atomizate și a metodelor de analiză și calcul a parametrilor jetului injectat.
- 7.6. Analiza formei jetului de combustibil de la ieșirea din injector până la intrarea în camera de ardere funcție de forma colectorului de admisie și a temperaturii acestuia.
- 7.7. Dezvoltarea unor modele noi privind instabilitatea jetului în cadrul procesului de atomizare a combustibilului specifice sistemele de injecție a benzinei, punându-se accent în special pe obținerea unor rezultatele cantitative corelate cu datele experimentale.

Bibliografie

- [AA08] Alisenda A, Hopfinger E.J., Lasheras J.C., Kremer D.M., Berchielli A., Connolly E.K., "Atomization of viscous and non-newtonian liquids by a coaxial, high-speed gas jet. Experiments and droplet size modeling", International Journal of Multiphase Flow 34, pag. 161–175, 2008.
- [AB13] Ashraf B., Safwat W., , *A Theoretical Model for predicting the mean Droplet Diameter in Spray based on the linear Stability Analysis*", International Journal of Control, Automation and Systems, ISSN 2165-8277 - ISSN 2165-8285, Vol.2 no.3, pp. 41-46, 2013.
- [AC03] Aalburg C., van Leer B., Faeth G.M., [Deformation and Drag Properties of Round Drops Subjected to shock Wave Disturbances], AIAA Journal, Vol. 41(12), pp. 2371-2378, 2003.
- [AN09] ANSYS Fluent 12.0 Guide, 2009.
- [AN11] Ashgriz N., [*Handbook of Atomization and Sprays, Theory and Applications*], University of Toronto Dept. Mechanical & Industrial Engineering, pp. 1-935, 2011.
- [AN13] ANSYS Fluent Theory Guide, 2013.
- [BC02] Baumgarten C., Stegemann J. and Merker G. P., "A new model for cavitation induced primary break-up of diesel sprays", ILASS-Europe, Zaragoza, pag. 7, 2002.
- [BE10] Bertakis E., Groß S., Grande J., Fortmeier O., Reusken A., Pfennig A., *"Validated simulation of droplet sedimentation with finite-element and level-set methods"*, Chemical Engineering Science, No. 65, pp. 2037–2051, 2010.
- [BD79] Bogy D. B., [*Drop formation in a circular liquid jet*], Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 11, pp. 207–228, 1979.
- [BG29] Bidone G., *"Experiences sur la forme et sur la direction des veines et des courants d'eau lances par diverses ouvertures*" Imprimerie Royale, Turin, pp. 1–136, 1829.
- [BK09] Benny K., *"CFD modelling of liquid jet and cascade breakup in crossflow"*, Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, pp. 1-6, 2009.
- [BM14¹] Beniuga M. C., [Stadiul actual privind procesul de atomizare si dinamica jetului de combustibil], Referat nr.1 în cadrul tezei de doctorat: "Cercetări privind atomizarea combustibilului la sistemele de injecție multipunct", Universitatea Ștefan cel Mare, Suceava, Facultatea de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management, pp. 1-65, 2014.
- [BM14²] Beniuga M. C., [Contribuții aduse la analiza procesului de atomizare şi în modelarea jetului de combustibil pulverizat], Referat nr.2 în cadrul tezei de doctorat: "Cercetări privind atomizarea combustibilului la sistemele de injecție multipunct", Universitatea Ștefan cel Mare, Suceava, Facultatea de Inginerie Mecanică, Mecatronică şi Management, pp. 1-87, 2014.
- [BM15¹] Beniuga M. C., [Cercetări experimentale privind atomizarea combustibilului la injecția multipunct], Referat nr.3 în cadrul tezei de doctorat: "Cercetări privind atomizarea combustibilului la sistemele de injecție multipunct", Universitatea Ștefan cel Mare, Suceava, Facultatea de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management, pp. 1-109, 2015.
- [BM15²] Beniuga, M., Mihai, I., Suciu, C., Sprinceană, S., "Atomization of liquid droplets in multipoint injection", Proc. SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VII, 92581R, doi:10.1117/12.2070428, pp. 92581R-1÷92581R-6., 2015.
- [BM15³] Beniuga, M., Mihai, I., Suciu, C., Sprinceană, S., "Friction coefficient influence upon fluid jet atomization", SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VII, Proc. 92582Q, doi: 10.1117/12.2070430, pp. 92582Q-1÷92582Q-6., 2015.
- [BM15⁴] Beniuga, M., Mihai, I., "Correlation models for pulverized fuel jet angle to internal combustion engines", Journal TEHNOMUS - New Technologies and Products in Machines Manufacturing Technologies, ISSN/ISBN P - ISSN-1224-029X E - ISSN-2247-6016, pp. 223-228, 2015.
- [BM15⁵] **Beniuga, M**., Mihai, I., *"Study on length of the undisturbed liquid jet in the atomization procese*", Journal TEHNOMUS New Technologies and Products in Machines

Manufacturing Technologies, ISSN/ISBN P - ISSN-1224-029X E - ISSN-2247-6016, pp. 229-234, 2015.

- [BM16¹] Beniuga, M., Mihai, I., "Studies concerning the effect of large droplets creation during fuel atomization", Proc. SPIE 10010, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII, 100101N, doi: 10.1117/12.2243005, pp. 10010N-1÷10010N-7, 2016.
- [BM16²] Beniuga, M., Mihai, I., "Influence of spray nozzle shape upon atomization process", Proc. SPIE 10010, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII, 100101L, doi:10.1117/12.2243130, pp. 10010l-1÷10010-8, 2016.
- [BM17¹] Beniuga, M., Mihai, I., "Analysis atomized gasoline jets with different pressure on different times injection", Journal TEHNOMUS - New Technologies and Products in Machines Manufacturing Technologies, în curs de publicare, pp. 222-227, 2017.
- [BM17²] Beniuga, M., Mihai, I., "Study heat transfer liquid droplets injected into non-isotermal and isotermal jets case", Journal TEHNOMUS - New Technologies and Products in Machines Manufacturing Technologies, în curs de publicare, pp. 228-233, 2017.
- [BR72] Burick R.J., [Space storable propellant performance program. Coaxial injectors characterization], NASA CR-120936, 1972.
- [BV68] Borodin V. A., Dltyakin Yu. P., Klyachko L A., Yagodkin V. I., [Atomization of liquids], 65-AM7020866, Document no. FTD-MT-24-Q7-68, Project no. 60401, 02-UR/0000/67/000/0001/0262, 310 pag., 1968.
- [CC05] Chryssakis C. A., Assanis D. N., [A Secondary Atomization Model for Liquid Droplet Deformation and Breakup under High Weber Number Conditions], ILASS Americas, 18th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Irvine, CA, pp. 1-8, 2005.
- [CC06] Chryssakis C., Assanis D.N., Bae C., "Development and validation of a comprehensive CFD model of diesel spray atomization accounting for high weber numbers", SAE Technical Paper Series 2006-01-1546, pp. 1-15, 2006.
- [CC08] Chryssakis C., Assanis D.N., "A unified fuel spray breakup model for internal combustion engine applications, Atomization and Sprays", Vol. 18(5), pp. 375–426, 2008.
- [CM02] Christopher M. V., Juan C. L., Emil J. H., *"Atomization of a small-diameter liquid jet by a high-speed gas stream*", Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, San Diego, 9 pag., 2002.
- [CN76] Chigier N. A., *"The atomization and burning of liquid fuel sprays"*, Progress in Energy and Combustion Science, Doi. 10.1016/0360-1285(76)90019-8, Vol. 2, pp. 97-114, 1976.
- [CR78] Clift R., Grace J.R., Weber M.E., [Bubbles, Drops and Particles], New York & London, Academic Press, 383 pag., 1978.
- [CS61] Chandrasekhar S., [*Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability*], Clarendon Press, Oxford, 657 pag., 1961.
- [CW97] Chou W.H., Hsiang L.P., Faeth G.M., [*Temporal properties of drop breakup in the shear breakup regime*], International Journal of Multiphase Flow, Vol. 23, No. 4, pp. 651-669, 1997.
- [DD11] Dobre D., [*Studiul constructiv funcțional al sistemelor de injecție de benzină*], Editura Sfântul Ierarh Nicolae, Galați, 136 pag, 2011.
- [DR66] Donnelly R. J. & Glaberson W., [*Experiments on the capillary instability of a jet*], Proceedings of the Royal Society A 209, pp. 547–556, 1966.
- [FG95] Faeth G.M., Hsiang L.-P., Wu P.-K., [Structure and Breakup Properties of Sprays], International Journal of Multiphase Flow, Vol. 21, Suppl., pp. 99-127, 1995.
- [GE70] Goedde E. F. & Yuen, M. C., [*Experiments on liquid jet instability*], Journal of Fluid Mechanics, Vol. 40, pp. 495–511, 1970.
- [GS13] Gunnar S., [Modeling Engine Spray and Combustion Processes], Springer Science & Business Media, 282 pag., 2013.
- [GÖ88] Gülder Ö.L., *"Temporally and spatially resolved drop sizing of dense diesel sprays*", In Proc. 2nd ILASS-Americas Annual Meeting, Pittsburgh, pp. 78–81, May 1988.
- [GR02] Grover R.O., Assanis D.N., Lippert A.M., El Tahry S.H., Drake M.C., Fansler T.D., Harrington D.L., *A critical analysis of splash criteria for GDI spray impingement*" ILASS

Americas, 15th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Madison, May 2002.

- [HA31] Haenlein A., [*Disintegration of a liquid jet*]. NACA-TM-659, 27 pag., 1931. https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc63598/
- [HW14] He W., Lv W, Dickerson J., [*Gas Transport in Solid Oxide Fuel Cells*], Chapter 2, Springer, 75 pag., 2014.
- [HK98] Huh K.Y., Lee E., Koo J.-Y., [Diesel spray atomization model considering nozzle exit turbulence conditions, Atomization and Sprays], Vol. 8, pp. 453–469, 1998.
- [HL92] Hsiang L.P., Faeth G.M., [*Near-limit drop deformation and secondary breakup*], International Journal of Multiphase Flow, Vol. 18, pp. 635-652, 1992.
- [HL93] Hsiang L.P., Faeth G.M., *"Drop properties after secondary breakup"*, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 19, (5), pp. 721–735, 1993.
- [ID93] Ibrahim E.A., Yang H.Q., Przekwas A.J., "Modeling of spray droplets deformation and breakup", Journal of Propulsion and Power, Vol. 9, No. 4, pp. 651-654, 1993.
- [IJ07] Ishimoto J., Hoshina H., Tsuchiyama T., Watanabe H., Haga A., Sato F., *"Integrated Simulation of the Atomization Process of a Liquid Jet Through a Cylindrical Nozzle*", Interdisciplinary Information Sciences, Doi-10.4036, Vol. 13, No. 1, pp. 7–16, 2007.
- [JD99] Joseph D.D., Belanger, J., & Beavers, G.S., *"Breakup of a liquid drop suddenly exposed to a high-speed air stream*", International Journal of Multiphase Flow, Vol. 25, pp. 1263-1303, 1999.
- [JT09] Jean T., [*Moteur à allumage commandé*], Machines Hydrauliques, Aerodynamiques et Thermiques, BM 2 540, Vol. 2, pp. 1-20, 2009
- [KJ73] Keller J. B., Rubinow S. I., & Tu Y. O., [*Spatial instability of a jet*], Physics of Fluids, Vol. 16, pp. 2052–2055, 1973.
- [LA89] Lefebvre A.H., [Atomization and Sprays], Hemisphere Publishing Corporation, 1989.
- [LJ00] Lasheras J.C., Hopfinger E.J., [*Liquid jet instability and atomization in a coaxial gas stream*], Annual Review of Fluid Mechanics, Vol 32, pp. 275-308, 2000.
- [LL09] Luis L. M., [*Injection d'essence dans les moteurs d'automobile*], Machines Hydrauliques, Aerodynamiques et Thermiques, BM 2 550, Vol. 2, pp. 1-24, 2009.
- [LS86] Leib S. J. & Goldstein M. E., [The generation of capillary instabilities on a liquid jet], Journal of Fluid Mechanics, Vol. 168, pp. 479–500, 1986.
- [LS89] Lin, S.P., Lian, Z.W., *Absolute instability of a liquid jet in a gas*", Physics of Fluids A, Vol. 1(3), pp. 490-493, 1989.
- [LS95] Lin S.P., "Regimes of jet breakup an breakup mechanisms (Mathematical aspects)", In "Recent Advances in Spray Combustion: Spray Atomization and Drop Burning Phenomena", ed. K. Kuo, 1, pp. 137-160, 1995.
- [LT96] Lee T.W., Mitrovic A., *"Liquid core structure of pressure atomized sprays via laser tomographic imaging"*, Journal: Atomization and Sprays, Vol. 6(1) pp. 111–126, 1996.
- [M14L] Mathcad 14, Licensed to: Stefan cel Mare University, Partially Product Code JE140709XX2311-XXD9-7VXX.
- [MA91] Mansour A., Chigier, N., "*Dynamic behavior of liquid sheets*", Physics of Fluids A, Vol. 3(12), pp. 2971-2980, 1991.
- [MC**] Mathcad 14, Licensed to: Stefan cel Mare University, Partially Product Code JE140709XX2311-XXD9-7VXX.
- [MB94] Munson B.R., Young D.F., T.H. Okiishi, [*Fundamentals of Fluid Mechanics*], 2nd Edition, Wiley, 893 pag., 1994.
- [MH10] Marcus H., [Detailed Numerical Simulations of the Primary Atomization of a Turbulent Liquid Jet in Crossflow], Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 132, 061506-1-10, 10 pag., 2010.
- [MD**] MiDas 4.0 Express for FASTEC Version 4.5.1.2, Software, Licensed to Stefan cel Mare University, Suceava.
- [ML97] Moyne L. L. [Contribution à l'étude de laformation du mélange des moteurs à allumage commandé àinjection multi-point], 251 pag., 1997.
 [Online http://luis.lemoyne.free.fr/these_LL.pdf, 1997], (vizualizat feb. 2014).

- [ML09] Moyne Le L., "Injection d'essence dans les moteurs d'automobile", Techniques de l'ingénieur, BM 2 550, pp. BM2 550-1+BM2 550-24, 2009
- [ML**] *Matlab license 07.02.2012, License number 708456*. R12a: MathWorks R2012a. 7.14.0.739, 2012.
- [MM74] McCarthy M. J. & Molloy N. A., *"Review of' stability of liquid jets and the influence of nozzle design"*, Chemical Engineering Journal Vol.7, pp. 1–20, 1974.
- [MN**] *µScan NanoFocus* date tehnice, www.nanofocus.com.
- [MS8b] Matlab Simulink 2008b, Licensed to: Stefan cel Mare University, License No. 564227.
- [NA71] Nayfeh A. H. & Hassan S.D., [*The method of multiple scales and nonlinear dispersive waves*], Journal of Fluid Mechanics, Vol. 48, pp. 463–475, 1971.
- [PJ73] Plateau J., [*Statique experimentale et theorique des liquids soumis aux seules forces moleculaires*] Cited by Lord Rayleigh, Theory of Sound, Vol. II, 363 pag., 1873.
- [PM98] Patterson M.A., Reitz R.D., [Modeling the Effects of Fuel Spray Characteristics on Diesel Engine Combustion and Emission], SAE 980131, 19 pag., 1998.
- [PP14] Philipp P., "Modeling of Collisional Transport Processes in Spray Dynamics", Dissertation, RWTH Aachen University, 174 pag., 2014.
- [RD87] Reitz R.D., [Modeling atomization processes in high-pressure vaporizing sprays, Atomisation and Spray Technology], Vol. 3, pp. 309–337, 1987.
- [RL97] Raynal L., [Instabilite et entrainement a l'interface d'une couche de mélange liquid gaz], These de Doctorat, Universite Joseph Fourier, Grenoble, France, 231 pag., 1997. https://books.google.ro/books/about/INSTABILITE_ET_ENTRAINEMENT_A_L_INTERF AC.html
- [RP87] O'Rourke P.J., Amsden A.A., *"The TAB Method for Numerical Calculation of Spray Droplet Breakup"*, SAE 872089, pp. 1-12, 1987.
- [RR87] Reitz R.D., Diwakar R., *"Structure of high-pressure fuel sprays*", SAE Technical Paper Series 870598, 20 pag., 1987.
- [RW45] Rayleigh W.S., [*Theory of Sound*], 2nd edn, London: Macmillan 1896, New York: Dover, Vol. 2, 504pag., Reprinted in 1945.
- [RW78] Rayleigh W.S., "On the instability of jets", Proceedings of the London Mathematical Society, Vol. 10, pp. 4–13, 1879.
- [RW82] Rayleigh W.S., "[Further observations upon liquid jets", Proceedings of the London Mathematical Society, Vol. 34, pp. 130–145, 1882.
- [SF11] Santos F.D., Le Moyne L., "Spray Atomization Models in Engine Applications, from Correlations to Direct Numerical Simulations", Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP Energies nouvelles, Vol. 66, No. 5, pp. 801-822, 2011.
- [SD99] Schmidt D.P., Nouar I., Senecal P.K., Rutland C.J., Martin J.K., Reitz R.D., "*Pressure-swirl atomization in the near field*" SAE Technical Paper Series 1999-01-0496, pp. 1-14, 1999.
- [SF33] Savart F., "Memoire sur la constitution des veines liquides lancees par des orifices circulaires en mince paroi" Ann. Chim. Phys. 53, pp. 337–386, 1833.
- [SP99] Senecal P.K., Schmidt D.P., Nouar I., Rutland C.J., Reitz R.D., Corradini M.L., "Modeling high-speed viscous liquid sheet atomization" International Journal of Multiphase Flow, Vol. 25, pp. 1073–1097, 1999.
- [SW00] Sirignano, W. A. & Mehring, C. [*Review of theory of distortion and disintegration of liquid streams*] Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 26 (4-6), pp. 609 –655, 2000.
- [SC16] Suciu, C., Beniuga, M., "Optical investigation of electromagnetic fuel atomizers", Proc. SPIE 10010, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII, 1001014, doi:10.1117/12.2243347, pp. 10010l4-1÷100140-6, 2016.
- [TB95] Tony B., Michelle H., Bob L., Glen M., Al O., *Atomization* Concept and Theory Training", Graco, Inc., Form No. 321-027 8/95, 21 pag., 1995.
- [TF97] Tanner F.X., *"Liquid jet atomization and droplet breakup modeling of non-evaporating diesel fuel sprays*", SAE Technical Paper Series 970050, 16 pag., 1997.
- [TF98] Tanner F.X., Weisser G., *"Simulation of liquid jet atomization for fuel sprays by means of a cascade drop breakup model*", SAE Technical Paper Series doi:10.4271/980808, 13 pag., 1998.

- [TT64] Taylor, T., Acrivos, A., "On the deformation and drag of a falling drop at low Reynolds numbers", J. Fluid Mech., Vol. 18, pp. 466–476, 1964.
- [VC01] Varga C. M., Hopfinger EJ, Lasheras JC, "Atomization of a small diameter liquid jet by a high-speed gas stream", APS Division of Fluid Dynamics Meeting Abstracts, pp. 1-9, 2001.
- [VP91] Vassallo P. & Ashgriz N., *"Satellite formation and merging in liquid jet breakup"* Proceedings of the Royal Society, pp. 269–286, 1991.
- [WC31] Weber C., [On the breakdown of a fluid jet], Zum Zerfall eines Flussigkeitsstrahles. Z. Angew, Math. und Mech. 11, pp 136–154 1931.
- [WM10] Woo M. W., Mujumdar A.S., Daud W.R.W., *"Spray Drying Technology"*, ISBN 978-981-08-6270-1, Vol. 1, pp. 1-223, Singapore, 2010.
- [YE09] Yajia E., Min X., Wei Z., Yuyin Z., David J., [An Experimental and Numerical Investigation on Characteristics of Methanol and Ethanol Sprays from a Multi-hole DISI Injector], The 13th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems - Asia, pp 1-6, 2009.
- [YY01] Yue Y., Powell C.F., Poola R., Wang J., and Schaller J.K., "Quantitative measurements of diesel fuel spray characteristics in the near-nozzle region using X-ray absorption", Journal: Atomization and Sprays, Vol. 11(4), pp. 471–490, 2001.
- [ZF99] Zhaoa F., Laia M. C., Harringtonb D.L., *Automotive spark-ignited direct-injection gasoline engines*", Progress in Energy and Combustion Science 25, PII: S0360-1285(99)00004-0, 0360-1285/99, pp. 437–562, 1999.
- [**AF] www.aficionadosalamecanica.com/inyeccion-d-jetronic.htm (vizualizat feb.2014).
- [**BO] <u>www.bosch.com</u> (vizualizat noiembrie 2014)
- [**EA] <u>www.e-automobile.ro</u> Sisteme de injectie de benzina (vizualizat feb.2014)
- [**EN] http://www.engenheiros.pt/~malheiro/img/tese.pdf
- [**FL] <u>www.flir.com</u> (vizualizat septembrie 2015)
- [**GA] <u>www.delphi.com</u> Gasoline Engine Management Systems (vizualizat feb.2014)
- [**NA] <u>www.nanofocus.com</u> (vizualizat septembrie 2015)
- [**SC] <u>www.scribd.com/doc/3299223/Bosch-KJetronic-Fuel-Injection-Manual</u> (vizualizat feb.2014)
- [**FL] <u>http://fluid.wme.pwr.wroc.pl/~spalanie/dydaktyka/combustion_MiBM/BCS/LIQUID</u> _FLUIDS_ATOMIZATION.PDF
- [**WI] https://ro.wikipedia.org/wiki/List%C4%83_de_leme_matematice

Diseminarea rezultatelor

Rapoarte de cercetare:

- 1. Beniuga M. C., [Stadiul actual privind procesul de atomizare si dinamica jetului de combustibil], Referat nr.1 în cadrul tezei de doctorat: "Cercetări privind atomizarea combustibilului la sistemele de injecție multipunct", Universitatea Ștefan cel Mare, Suceava, Facultatea de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management, pp. 1-65, 2014.
- 2. Beniuga M. C., [Contribuții aduse la analiza procesului de atomizare și în modelarea jetului de combustibil pulverizat], Referat nr.2 în cadrul tezei de doctorat: "Cercetări privind atomizarea combustibilului la sistemele de injecție multipunct", Universitatea Ștefan cel Mare, Suceava, Facultatea de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management, pp. 1-87, 2014.
- 3. Beniuga M. C., [Cercetări experimentale privind atomizarea combustibilului la injecția multipunct], Referat nr.3 în cadrul tezei de doctorat: "Cercetări privind atomizarea combustibilului la sistemele de injecție multipunct", Universitatea Ștefan cel Mare, Suceava, Facultatea de Inginerie Mecanică, Mecatronică și Management, pp. 1-109, 2015.

ISI Conferince Proceedings:

4. Beniuga, M., Mihai, I., Suciu, C., Sprinceană, S., "Atomization of liquid droplets in multipoint injection", Proc. SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics,

Microelectronics, and Nanotechnologies VII, 92581R, doi:10.1117/12.2070428, pp. 92581R -1÷92581R -6., 2015.

- Beniuga, M., Mihai, I., Suciu, C., Sprinceană, S., "Friction coefficient influence upon fluid jet atomization", SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VII, Proc. 92582Q, doi: 10.1117/12.2070430, pp. 92582Q -1÷92582Q -6., 2015.
- Sprinceana, S., Mihai, I., Beniuga, M., Suciu, C., *"Heat transfer intensification by increasing vapor flow rate in flat heat pipes*", Proc. SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VII, 92581P, doi: 10.1117/12.2070417, pp. 92581P-1÷92581P-7., 2015.
- Sprinceana, S., Mihai, I., Beniuga, M., Suciu, C., *"Capillary structure effect on the heat transfer to flat heat pipes*", Proc. SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VII, 92581Q, doi:10.117/12,2070423, pp. 92581Q-1÷92581Q -6., 2015.
- 8. Andronic, F., Mihai, I., Suciu, C., **Beniuga, M.**, *"Frequency analysis of a semi-active suspension with magneto-rheological dampers*", Proc. SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VII, 925822, doi:10.1117/12.2070339, (nr. 54), 2015.
- Andronic, F., Mihai, I., Suciu, C., Beniuga, M., "Applications of magneto-rheologic fluids in semi-active suspension systems", Proc. SPIE 9258, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotchnologies VII, 925823, doi:10.1117/12.2070345, (nr. 57), 2015.
- Beniuga, M., Mihai, I., *"Studies concerning the effect of large droplets creation during fuel atomization*", Proc. SPIE 10010, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII, 100101N, doi: 10.1117/12.2243005, pp. 10010N-1÷10010N-7, 2016.
- Beniuga, M., Mihai, I., "Influence of spray nozzle shape upon atomization process", Proc. SPIE 10010, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII, 100101L, doi:10.1117/12.2243130, pp. 10010l-1÷10010-8, 2016.
- Suciu, C., Beniuga, M., "Optical investigation of electromagnetic fuel atomizers", Proc. SPIE 10010, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies VIII, 1001014, doi:10.1117/12.2243347, pp. 140-1÷140-6, 2016.

BDI journal:

- Beniuga, M., Mihai, I., "Correlation models for pulverized fuel jet angle to internal combustion engines", Journal TEHNOMUS New Technologies and Products in Machines Manufacturing Technologies, ISSN/ISBN P ISSN-1224-029X E ISSN-2247-6016, 2015.
- Beniuga, M., Mihai, I., ,*Study on length of the undisturbed liquid jet in the atomization procese*", Journal TEHNOMUS New Technologies and Products in Machines Manufacturing Technologies, ISSN/ISBN P ISSN-1224-029X E ISSN-2247-6016, 2015.
- 15. **Beniuga, M.**, Mihai, I., *Analysis atomized gasoline jets with different pressure on different times injection*", Journal TEHNOMUS New Technologies and Products in Machines Manufacturing Technologies, în curs de publicare, 2017.
- 16. **Beniuga, M.**, Mihai, I., "Study heat transfer liquid droplets injected into non-isotermal and isotermal jets case", Journal TEHNOMUS New Technologies and Products in Machines Manufacturing Technologies, în curs de publicare, 2017.