



Universitatea  
Ștefan cel Mare  
Suceava

Facultatea de Inginerie  
Mecanică, Autovehicule  
și Robotică

# TEZĂ DE DOCTORAT

DOMENIUL INGINERIE MECANICĂ

## Influența temperaturii gazelor de evacuare a motoarelor diesel asupra noxelor și formării depunerilor solide la injecția AdBlue în sistemele de reducere catalitică selectivă

### REZUMAT

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

*Prof.univ.dr.ing.* Ioan MIHAI

DOCTORAND:

*Ing.* Claudiu-Marian PICUS

SUCEAVA, 2024

## CUVÂNT ÎNAINTE

Teza de doctorat a fost elaborată în cadrul Departamentului de Mecanică și Tehnologii al Facultății de Inginerie Mecanică, Autovehicule și Robotică din cadrul Universității „Ștefan cel Mare” din Suceava. Prezenta teză de doctorat reprezintă cumularea activității a peste cinci ani de studii intensive, cercetări meticuloase și experimentări continue, astfel încât aș dori să exprim sincerele mele mulțumiri tuturor persoanelor care m-au călăuzit în acest proces al cunoașterii și explorării științifice.

Sub îndrumarea atentă a domnului *prof. univ. dr. ing.* Ioan Mihai, a fost elaborată prezenta teză de doctorat intitulată *“Influența temperaturii gazelor de evacuare a motoarelor diesel asupra noxelor și formării depunerilor solide la injecția AdBlue în sistemele de reducere catalitică selectivă”*. Lucrarea a beneficiat de suport financiar pe o perioadă de 12 luni, prin accesarea proiectului *“DECIDE - Dezvoltare prin educație antreprenorială și cercetare inovativă doctorală și postdoctorală”*, Cod proiect POCU/380/6/13/125031, proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Capital Uman 2014 – 2020”.

Pe această cale, doresc să-mi exprim mulțumirea și gratitudinea față de domnul *prof.univ.dr. ing.* **Ioan MIHAI**, pentru sprijinul necondiționat oferit, răbdarea, rigurozitatea și disciplina impuse pe parcursul întregului program de cercetare.

De asemenea mulțumesc distinșilor membri invitați din Comisia de doctorat: *prof.univ.dr.ing.* **Dinel POPA** de la Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București – Centrul Universitar Pitești, *prof.univ.dr.ing.* **Mircea BOȘCOIANU** – Universitatea „Transilvania” din Brașov, *prof.univ.dr.ing.* **Nicolae ISPAS** – Universitatea „Transilvania” din Brașov, *conf.univ.dr.ing.* **Dragoș Sorin DIMA** - Universitatea „Transilvania” din Brașov, pentru bunăvoința de a-mi analiza lucrarea și de a fi acceptat participarea în comisie.

Mulțumesc membrilor comisiei de tutori, respectiv: *prof.univ.dr.ing.* **Ilie MUSCĂ**, *prof.univ.dr.ing.* **Marilena GLOVNEA** și *prof.univ.dr.ing.* **Stelian ALACI**, pentru sugestiile transmise cu ocazia susținerii referatelor științifice, sfaturi ce au avut ca scop propriul progres și, bineînțeles, rafinarea tezei de doctorat.

Prezenți în mod activ în ceea ce privește formarea mea profesională au fost și membrii colectivului de cadre didactice din cadrul Facultății de Inginerie Mecanică, Autovehicule și Robotică a Universității “Ștefan cel Mare” Suceava. Am beneficiat de susținere continuă prin transmiterea de idei, cunoștințe, încurajări, iar, din punct de vedere logistic, am avut acces la toate echipamentele necesare.

Nu în ultimul rând, doresc să adresez deplina mea recunoștință familiei, soției, pentru răbdarea, bunăvoința, înțelegerea și sprijinul neîntrerupt de care au dat dovadă pe toată perioada studiilor doctorale.

*Claudiu – Marian PICUS*

Suceava, iunie 2024

## CUPRINS

	<b>REZ.</b>	<b>TEZĂ</b>
<b>CUVÂNT ÎNAINTE.....</b>	<b>1</b>	<b>III</b>
<b>CUPRINS.....</b>	<b>2</b>	<b>V</b>
<b>1. DEZVOLTAREA SISTEMELOR DE REDUCERE CATALITICĂ SELECTIVĂ (SCR) PÂNĂ ÎN STADIUL ACTUAL.....</b>	<b>4</b>	<b>1</b>
1.1. Introducere. Scurt istoric privind apariția sistemelor SCR .....	4	1
1.2. Justificarea abordării temei de cercetare. Limite impuse emisiilor la motoarele diesel .....	5	3
1.2. Clasificarea sistemelor SCR .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>	8
1.3.1. Sistemul de reducere catalitică selectivă (SCR).....	7	13
1.3. Metode active de reducere a poluanților la motoarele diesel .....	8	14
1.4.1. Preîncălzirea gazelor de ardere înaintea SCR la motoarele diesel .....	8	14
1.4.2. Influența temperaturii gazelor de evacuare asupra formării depunerilor solide de uree la injecția AdBlue în SCR.....	8	22
1.4. Obiectivele propuse pentru îmbunătățirea influenței temperaturii gazelor de evacuare asupra sistemelor SCR .....	11	30
<b>2. CONTRIBUȚII ADUSE LA IMPLEMENTAREA UNOR SOLUȚII CONSTRUCTIVE PENTRU CREȘTEREA EFICIENȚEI SCR.....</b>	<b>14</b>	<b>33</b>
2.1. Conceperea unui stand pentru studiul pseudo-desublimării soluției de AdBlue .....	14	34
2.2. Contribuții aduse la implementarea unor soluții constructive pentru îmbunătățirea eficacității SCR.....	15	35
2.3. Implementarea unui ejector pentru dispersia și transportul picăturilor de AdBlue la SCR.....	16	38
2.4. Conceperea unui element magnetostrictiv pentru fragmentarea jetului de AdBlue la SCR.....	17	39
2.5 Contribuții aduse la implementarea elementelor piezoelectrice pentru generarea vaporilor de AdBlue.....	19	42
2.6. Contribuții aduse în implementarea unui sistem de preîncălzire a gazelor de evacuare, înaintea SCR.....	20	45
2.7. Configurația standului experimental și echipamentele de măsură utilizate .....	22	49
<b>3. TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ȘI MASĂ ÎN SISTEMELE DE REDUCERE CATALITICĂ SELECTIVĂ.....</b>	<b>24</b>	<b>52</b>
3.1. Introducere .....	24	52
3.2. Contribuții aduse la determinarea analitică a temperaturii picăturii de AdBlue injectate în volumul gazelor de evacuare ale SCR, fără considerarea fenomenului difuziv .....	24	54
3.3. Contribuții privind determinarea diametrului picăturilor de AdBlue injectate în volumul gazelor de evacuare ale SCR, cu și fără considerarea fenomenul difuziv .....	27	58
3.4. Contribuții privind schimbul de căldură la injecția AdBlue pe suprafețe în regim pelicular .....	31	64
3.5. Intensificarea transferului de căldură și de masă prin utilizarea undelor ultrasonore în cadrul procesului de calefacție.....	34	68
3.5.1. Calculul variației temperaturii suprafeței discului magnetostrictiv la impactului cu picăturile de AdBlue, cu și fără ultrasunete .....	34	68
3.6. Simularea proceselor de căldură și masă la sistemele SCR .....	36	74
3.6.1. Contribuții privind calculul dinamic și simularea vaporizării picăturilor de AdBlue utilizând modelul VOF .....	36	74
3.6.2. Contribuții privind simularea variației temperaturii în zona de preîncălzire locală a tubulaturii de evacuare .....	37	76
3.6.3. Contribuții privind simularea schimbului termic convectiv la injecția AdBlue într-un mediu gazos fierbinte.....	37	77
3.6.4. Analiza procesului de schimbare a masei vaporilor de AdBlue în cazul pseudo-desublimării .....	38	79
<b>4. METODOLOGIA ȘI ECHIPAMENTELE UTILIZATE ÎN CERCETARE .....</b>	<b>42</b>	<b>88</b>
4.1. Contribuții aduse la conceperea și realizarea unui stand destinat studiului pseudo-desublimării .....	42	90
4.2. Echipamentul folosit pentru studiul calefacției la adiția de AdBlue utilizând ultrasunete .....	42	90
4.3. Realizarea unui sistem de eiecție utilizat pentru amestecarea gazelor de ardere cu picăturile de AdBlue.....	43	94
4.4. Contribuții privind sistemul de preîncălzire a gazelor de ardere.....	45	96

4.5. Contribuții privind sistemul de monitorizare a temperaturii gazelor de evacuare la SCR.....	47	98
4.6. Descrierea standului GTAT-T003&GTAT-T009 pentru studiul influenței temperaturii gazelor de evacuare a motoarelor diesel asupra noxelor și formării depunerilor solide la injecția AdBlue în SCR .....	48	99
4.7. Prezentarea elementelor componente ale standului experimental .....	48	101
<b>5. REZULTATE EXPERIMENTALE ȘI INTERPRETAREA LOR.....</b>	<b>50</b>	<b>107</b>
5.1. Planul de experimente utilizat pentru determinarea noxelor și temperaturii la utilizarea sistemului SCR .....	50	107
5.2. Contribuții privind analiza calorimetrică la descompunerea ureei în timpul transferului termic.....	51	108
5.3. Contribuții aduse la punerea în evidență a procesului de pseudo-desublimare a picăturilor de AdBlue.....	52	110
5.4. Analiza prin microscopie cu scanare diferențială SEM a morfologiei cristalelor rezultate în urma pseudo-desublimării.....	55	114
5.5. Contribuții aduse la evidențierea apariției reziduurilor de uree în zona de injecție și pe fagurele SCR la adăugarea de AdBlue .....	58	117
5.5.1. Determinări experimentale care confirmă depunerea reziduurilor de uree în zona de injecție a soluției de AdBlue .....	58	117
5.5.2. Determinări experimentale care confirmă depunerea reziduurilor de uree în zona fagurelui catalizatorului SCR .....	61	120
5.6. Contribuții asupra metodelor de intensificare a procesului de atomizare a picăturilor de AdBlue.....	64	123
5.6.1. Utilizarea concentratoarelor magnetostrictive pentru atomizarea picăturilor de AdBlue ..	64	123
5.6.2. Studiul procesului de calefacție a picăturilor de AdBlue și utilizarea tehnicii IR pentru vizualizarea fenomenului .....	66	125
5.6.3. Evidențierea experimentală a rolului undelor ultrasonice asupra depunerilor de cristale la o suprafață în cazul fenomenului de calefacție .....	67	126
5.7. Contribuții aduse la analiza termică a zonei catalizatorului SCR .....	70	130
5.7.1. Analiza în IR a temperaturii zonei de injecție a soluției de AdBlue și a catalizatorului SCR.....	70	130
5.7.2. Contribuții aduse la implementarea unui sistem de preîncălzire a gazelor de evacuare amplasat în zona ejectorului.....	71	132
5.7.3. Contribuții aduse la aplicarea sistemului inductiv de preîncălzire pe tubulatura de evacuare.....	73	134
5.7.4. Evoluția temperaturii gazelor de evacuare pe fiecare tronson al sistemului SCR .....	74	135
5.7.5. Analiza comparativă a emisiilor NOx la motorul diesel ISUZU 4JB1 .....	76	152
5.7.6. Compararea rezultatelor experimentale cu cele din cercetări similare .....	78	155
<b>6. CONCLUZII ȘI DIRECȚII DE CERCETARE.....</b>	<b>81</b>	<b>157</b>
6.1. Contribuții teoretice privind influența temperaturii gazelor de evacuare a motoarelor diesel la eliminarea depunerilor de reziduuri de AdBlue și diminuarea noxelor .....	81	157
6.2. Contribuții aduse la <i>conceperea</i> de standuri și echipamente destinate reducerii depunerilor și noxelor în sistemele SCR.....	83	159
6.3. Contribuții privind <i>realizarea</i> părții experimentale destinate reducerii depunerilor și noxelor la sistemele SCR în dependență de temperatura de evacuare a motoarelor diesel .....	83	160
6.4. Contribuții aduse la obținerea și interpretarea rezultatelor experimentale .....	84	160
6.5. Direcții de cercetare .....	87	163
<b>BIBLIOGRAFIE (Selectivă) .....</b>	<b>88</b>	<b>164</b>



# 1. DEZVOLTAREA SISTEMELOR DE REDUCERE CATALITICĂ SELECTIVĂ (SCR) PÂNĂ ÎN STADIUL ACTUAL

## 1.1 Introducere. Scurt istoric privind apariția sistemelor SCR

De-a lungul istoriei, preocuparea primară pentru conservarea mediului și reducerea emisiilor dăunătoare provenite de la sursele de poluare a reprezentat una dintre cele mai importante direcții de interes pentru umanitate [KR12], [BC\*\*]. Istoria sistemelor de reducere catalitică selectivă (SCR - *Selective Catalytic Reduction*) își are începutul în anii '50. Prin cercetările efectuate în acea perioadă, oamenii de știință au descoperit că anumiți compuși metalici pot reacționa cu oxizii de azot (NO<sub>x</sub> - termen generic pentru oxizii de azot: monoxidul de azot - NO și dioxidul de azot - NO<sub>2</sub>), rezultând convertirea acestora în substanțe inofensive pentru mediu, respectiv în azot (N<sub>2</sub>) și apă (H<sub>2</sub>O). Aceste descoperiri au marcat debutul dezvoltării tehnologiilor SCR, [MC07], și au constituit un moment esențial în eforturile de reducere a emisiilor poluante.

*De-a lungul primelor decade de la apariție, sistemele SCR au fost adaptate și implementate mai întâi într-o gamă variată de sectoare industriale.*

Inițial, sistemele SCR au fost introduse în centralele termice și instalațiile industriale pentru a reduce emisiile de NO<sub>x</sub>.

*Principiul utilizat de sistemele SCR a fost patentat în SUA de Englehard Corporation în 1957, după cum afirmă Bruce G. Miller, [BM11], și au vizat utilizarea amoniacului (NH<sub>3</sub>) ca reactiv pentru a reduce oxizii de azot (NO<sub>x</sub>), conform surselor [CJ61], [AH62], [TL70], [BT16].*

*Primul sistem SCR utilizat la scară largă a fost instalat de IHI Corporation în 1978, la instalațiile generatoare de abur, [BW07].*

Datorită legislației riguroase privind emisiile de oxid de azot (NO<sub>x</sub>), Germania a fost printre primele țări care a adoptat sistemele SCR, iar din 1986, [BM11], a impus instalarea sistemelor de reducere a emisiilor pe diferite echipamente. Similar, Japonia a introdus în anii '80 tehnologia SCR în industrie, aplicând-o la generatoarele pe bază de cărbune. În Statele Unite, [CJ06], [PF10], [TS21], companiile de utilități au început să implementeze între anii 1991 și 1993 tehnologia SCR pentru unitățile pe bază de cărbune. Până în 2009, [CJ06], [PF10], [TS21], au fost instalate peste o mie de sisteme SCR pe o varietate de unități, incluzând boilere utilitare și industriale, încălzitoare, turbine cu gaz, motoare cu ardere internă, uzine chimice, precum și în industria metalurgică.

*Industria navală a adoptat sistemele SCR pe motoarele marine încă din anii 1990, [DC91], [GJ91], [CS94], [CH95], [BS03], odată cu intensificarea preocupărilor privind emisiile motoarelor diesel.*

Utilizarea sistemelor SCR pentru controlul NO<sub>x</sub> la vehiculele mobile, [MA23], a început cu motoarele marine. Dimensiunile mari și modelele de funcționare în regim staționar ale unităților marine au făcut ca adaptarea tehnologiei SCR staționar să fie relativ simplă. Primele unități SCR au fost instalate în 1989 și 1990, [GJ91], pe două nave coreene. Navele, echipate cu motoare diesel MAN B&W în 2 timpi de 8 MW, au fost dotate cu sisteme SCR cu amoniac proiectate pentru o reducere de 92% a NO<sub>x</sub>. Gazele de evacuare treceau prin reactor numai atunci când navele navigau în ape supuse reglementărilor privind emisiile de NO<sub>x</sub>.

*Primul autoturism echipat cu tehnologia SCR a fost Mercedes E220 (2,2L) BlueTec pentru piața americană, în 2007/2008, [AE11].*

Ulterior, alți producători de automobile, precum Audi, Mazda, VW și BMW, au introdus noi aplicații ale sistemului SCR.

În prezent, sistemele actuale de evacuare echipate cu SCR au câteva caracteristici comune:

- a) catalizatorul catalitic de oxidare diesel (DOC - **D**iesel **O**xidation **C**atalysts) este plasat cât mai aproape de motor pentru a permite încălzirea rapidă a acestuia;
- b) filtrul de particule pentru motoare diesel (DPF - **D**iesel **P**article **F**ilter) este amplasat în fața catalizatorului SCR;
- c) în scopul obținerii unui amestec optim, se mențin distanțe semnificative între punctul de injecție a ureei și catalizatorul SCR ( $> 400\text{mm}$ ) [AE11].

## 1.2 Justificarea abordării temei de cercetare. Limite impuse emisiilor la motoarele diesel

În urma studiilor și cercetărilor efectuate, [MC07], [KR12], [BC\*\*], se poate afirma că sistemele SCR au devenit esențiale și eficiente în lupta împotriva poluării și a reducerii impactului negativ asupra calității aerului.

Până în prezent, s-au dezvoltat două tipuri principale de sisteme SCR:

- a) **SCR pe bază de amoniac**: implică injectarea directă a amoniacului ca agent reactiv în fluxul de gaze arse, [HI05], fiind folosit, în principal, în industrie,
- b) **SCR pe bază de uree**: această tehnologie, [MA23], a fost adoptată ca strategie de reducere a NOx la majoritatea tipurilor de motoare diesel mobile.

Sistemele uree-SCR includ, de obicei, un catalizator SCR, un catalizator de oxidare auxiliar și un sistem de injecție care furnizează o soluție apoasă de uree în amonte de catalizatorul SCR.

*Gradul de reducere a NOx depinde de nivelul de temperatură a catalizatorului și de o strategie complexă de control a injecției de uree, realizată prin control electronic.*

În contextul creșterii necesarului de energie în ultimele decenii, combustibilii fosili, precum cărbunele, gazele naturale, benzina și motorina, [LH19], [MR22], au devenit principala sursă de energie utilizată la nivel global. Sursele amintite reprezintă aproximativ 90% din totalul energiei globale consumate. Cu toate acestea, [MR22], în ultimele decenii, emisiile de poluanți rezultate din arderea combustibililor fosili au consecințe din ce în ce mai grave pentru mediu.

*Justificarea cercetărilor are la bază faptul că utilizarea intensă a motoarelor diesel în diverse domenii, cum ar fi automobilele, locomotivele și motoarele marine, [PF10], se datorează randamentului lor ridicat. Se impun noi metode de depoluare a motoarelor diesel.*

Emisiile antropogene de NOx, [MR22], la nivel mondial sunt estimate la aproximativ 50 milioane tone/an. Statele Unite ale Americii generează aproximativ 20 milioane tone/an de oxizi de azot, din care aproximativ 40% provin din surse mobile. Concentrațiile medii anuale de dioxid de azot la nivel global se situează între  $20\mu\text{g}/\text{m}^3$  și  $90\mu\text{g}/\text{m}^3$ , cu valori maxime care pot depăși  $850\mu\text{g}/\text{m}^3$  în jumătate de oră. În zonele învecinate drumurilor intens circulate, concentrațiile orare pot depăși  $1000\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Conform regulilor pentru măsurarea emisiilor, [LP16], pragul maxim admis la Euro VI pentru oxizii de azot NOx este de  $0,46\text{g}/\text{kWh}$ . Alte reguli Euro VI pentru teste tranzitorii (RDE - Real Driving Emissions) includ limite pentru amoniac NH<sub>3</sub> ( $10\text{ppm}$ ), monoxidul de carbon CO ( $4\text{g}/\text{kWh}$ ), hidrocarburile nearse HC ( $0,16\text{g}/\text{kWh}$ ) și particule în suspensie PM (diesel Particulate Matter) ( $0,01\text{g}/\text{kWh}$ ).

Numărul de camioane pe șosele, [AB22], a înregistrat o creștere în decursul anilor. Cu toate acestea, emisiile generate de camioane se pot reduce prin implementarea rezultatelor **unor noi cercetări în domeniu** care privesc modernizarea sistemele SCR.

Odată cu evoluția tehnologiei SCR și a reglementărilor privind emisiile, se anticipează că aceste sisteme vor juca un rol important în crearea unui viitor mai curat și sustenabil.

*Modelele matematice de determinare a timpilor și ratei de vaporizare a picăturilor de AdBlue justifică necesitatea cercetărilor în domeniu prin stabilirea unor praguri funcționale ale temperaturii care să determine aplicarea unor metode de optimizare a funcționării catalizatorului SCR în dependență de temperatura gazelor de evacuare.*

*Știrile actuale înștiințează diminuarea în timp a noxelor motoarelor diesel cât și a faptului că normele Euro 7 sunt mai drastice decât cele anterioare, este justificat să se facă noi cercetări în domeniu care să asigure un proces mai avansat de fărâmițare a picăturilor de AdBlue. Cercetările au ca scop să se obțină o atomizare atât de fină a picăturilor (3-7μm) încât noxele să scadă cu câteva zeci de procente.*

*Prin cercetările efectuate se dorește să se elimine formarea depunerilor în microcanalele sistemelor SCR prin tehnici care asigură preîncălzirea gazelor de evacuare atunci când pragul de temperatură din catalizator nu atinge valorile optime.*

### 1.3 Încadrarea modernizării sistemelor SCR în preocupările internaționale, naționale, zonale, ale colectivului de cercetare la clasificarea sistemelor SCR

Figura 1.4 reprezintă o clasificare a sistemelor SCR în funcție de diferite variabile fizico-chimice și geometrice.

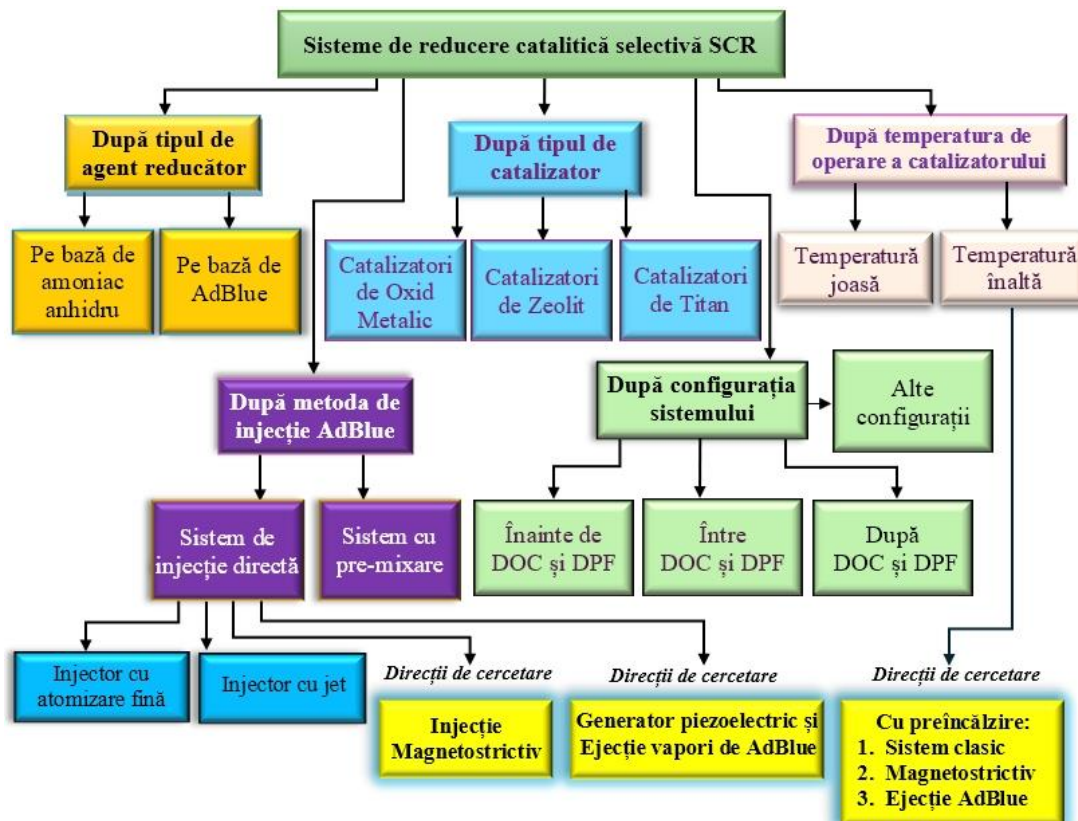


Fig. 1.4. Clasificarea sistemelor SCR după modul de utilizare și soluțiile noi propuse.

Pornind de la sistemele SCR dezvoltate până în stadiul actual, cercetările efectuate în prezenta lucrare își propun câteva direcții de cercetare care pot contribui la evoluția tehnologiei utilizării AdBlue, după cum urmează:

- **utilizarea principiului Magnetostrictiv** care are ca soluție practică utilizarea atomizării picăturilor folosind o tehnică prin care injecția soluției de AdBlue se realizează pe o placă atașată unui generator cu ultrasunete de tip magnetostrictiv - realizat de autor - înaintea SCR (nu se mai face injecția în fluxul de gaze de evacuare),
- **creșterea gradului de atomizare a picăturilor de AdBlue** folosind celule piezoelectrice generatoare de picături atomizate și un procedeu de ejecție a acestora către axul de curgere a vinei de gaze de evacuare, înaintea SCR,
- **intensificarea transferului termic** prin utilizarea unui sistem de preîncălzire inductiv (realizat de autor) utilizat pentru creșterea eficienței de conversie a catalizatorului SCR.

Utilizând tehnicile prezentate, se estimează că apare o creștere a gradului de atomizare a picăturilor de AdBlue, care asigură o intensificare a procesului de difuzie și o creștere a eficienței SCR. Pe lângă aplicarea acestor metode se vor studia și condițiile apariției *cristalizării* soluției de AdBlue la catalizatoarele sistemelor SCR, cu scopul înțelegerii mecanismelor care conduc la formarea cristalelor și dependenței acestui fenomen de temperatura de lucru.

Direcțiile de cercetare, creionate mai sus, vor fi dezvoltate pe parcursul lucrării.

Oxizii de azot (NO<sub>x</sub>) se degajă în cantități mari, predominant în condiții de temperaturi extrem de înalte în camera de ardere și în prezența unui conținut mare de oxigen, [LP16]. Strategiile de reducere a poluanților în cazul motoarelor diesel se pot clasifica în trei categorii principale, conform tabelului 1.4.

**Tab. 1.1. Metode de scădere a emisiilor la motoarele diesel.**

Metode	Strategii de obținere
<b>Passive</b>	Filtrarea particulelor Catalizator de oxidare Reducerea catalitică selectivă (SCR)
<b>Active</b>	Optimizarea injectării de combustibil Controlul temperaturii de ardere Recircularea gazelor arse Turbosuflantă cu bypass Sisteme de încălzire a gazelor de evacuare
<b>Acționare asupra combustibililor</b>	Utilizarea aditivilor Biocombustibili

După cum reiese din tabel, se folosesc următoarele **metode** de reducere a poluanților:

- **passive**, care vizează captarea și neutralizarea poluanților după formarea acestora în camera de ardere;
- **active**, care se concentrează pe prevenirea formării poluanților prin optimizarea procesului de combustie;
- **de acționare asupra combustibililor**, care vizează aditivarea acestora sau utilizarea așa-zisilor combustibili verzi cu scopul reducerii emisiilor poluante, [SV15], [BN16], [XZ23].

### 1.3.1 Sistemul de reducere catalitică selectivă (SCR)

În procesele de denitrificare a gazelor de evacuare, bazate pe principiul reducerii catalitice selective, [NI14], [EE16], uzual, se utilizează injecția unui agent reactiv în cantități foarte precise. De obicei, se folosește o soluție de uree, cunoscută sub denumirea de AdBlue, injectată în fluxul gazelor de evacuare. Un catalizator de hidroliză, [RB03], extrage apoi amoniac din soluția de uree. Amoniacul reacționează cu NO<sub>x</sub> în catalizatorul SCR, pentru a forma azot și apă, [RB03]. În figura 1.8 este prezentată structura unui SCR, [ES11].



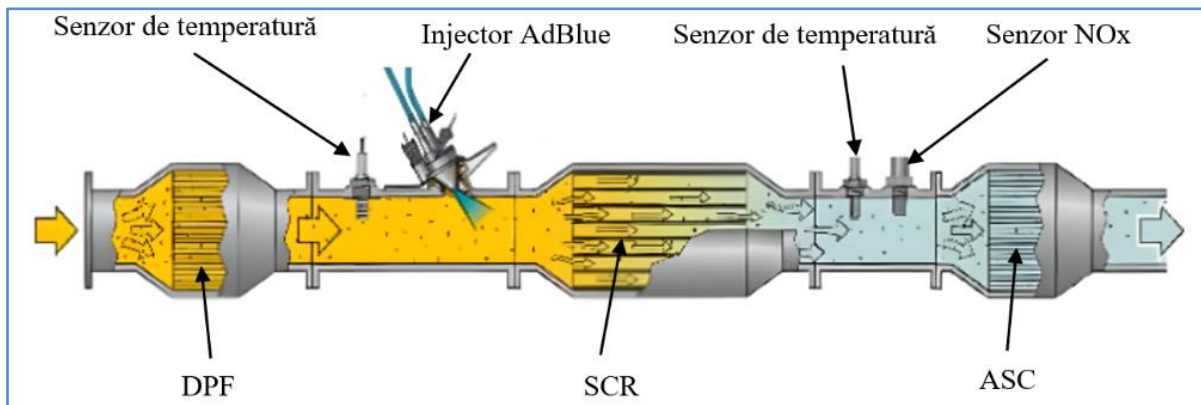


Fig. 1.8. Structura unui sistem de reducere catalitică selectivă, [ES11].

Gazele rezultate în urma combustiei, provenite de la motor, sunt direcționate inițial prin catalizatorul de oxidare (DOC) (nereprezentat în figură), apoi trec prin filtrul de particule (DPF) și ajung în zona SCR, în amonte ale căruia se injectează AdBlue. Înaintea injectorului de AdBlue, este tipic să se monteze un senzor de temperatură, responsabil de monitorizarea temperaturii gazelor evacuate. Injectorul este plasat înaintea fagurelui SCR. Gazele de evacuare fierbinți, împreună cu soluția de AdBlue, atomizată sau injectată în formă de jet lichid, traversează catalizatorul SCR și ajung în proximitatea unui alt senzor de temperatură. Acesta are rolul de a monitoriza temperatura în aval de SCR, fiind montat în proximitatea unui senzor de NOx care monitorizează rata de conversie. În vehiculele recente, care utilizează motoare diesel, [MT20], se pot integra și catalizatoare pentru oxidarea amoniacului ASC (Ammonia Slip Catalyst), cu rolul de a realiza conversia surplusului de amoniac.

## 1.4 Metode active de reducere a poluanților la motoarele diesel

### 1.4.1 Preîncălzirea gazelor de ardere înaintea SCR la motoarele diesel

La motoarele diesel prevăzute cu SCR, este esențial ca temperatura gazelor de ardere să aibă valori de peste 453K, astfel încât catalizatoarele să poată face conversia chimică, [HK89].

*Până în prezent s-au dezvoltat metode active de reducere a poluanților:*

- de **preîncălzire** a gazelor de evacuare înainte de catalizatorul SCR;
- de **încălzire directă** a catalizatorului SCR.

În decursul anilor, s-au implementat sisteme de preîncălzire a gazelor de evacuare înainte ca acestea să ajungă la catalizatorul SCR. Aceste tehnologii au debutat încă de la începutul anilor 1980, conform lui Hellman, K.H.ș.a., [HK89], care au studiat materialele din componența SCR, ca parte a unui sistem de evacuare.

*Experimental, Hellman, K. H. ș.a., [HK89], constată că în exploatarea SCR, cantitatea de noxe crește în cazul funcționării motorului diesel la rece, explicație pusă pe seama temperaturii scăzute a gazelor de ardere.*

Ulterior, în 1996, a fost montat un sistem de preîncălzire a gazelor de evacuare de către BMW pe modelul ALPINA B12 5.7, fiind primul autovehicul echipat cu tehnologie progresivă de reducere a emisiilor gazelor de evacuare. Această tehnologie, cunoscută sub numele de **Electrically Heated Catalyst (EHC)**, [HF96], face ca eficiența să fie accentuată în mod semnificativ printr-un proces de încălzire alternativă a ambelor catalizatoare.

### 1.4.2 Influența temperaturii gazelor de evacuare asupra formării depunerilor solide de uree la injecția AdBlue în SCR

Deși ureea este eficientă în eliminarea NOx din gazele de evacuare ale motoarelor diesel, există câteva inconveniente în ceea ce privește acest sistem.

*Situația ideală în sistemele SCR care funcționează pe bază de uree este ca întreaga cantitate injectată să se vaporizeze și să elibereze  $NH_3$  pentru a se reduce  $NO_x$ .*

*Există riscul de a adăuga cantități prea mari sau prea mici de  $NH_3$  în sistemul SCR [NI14], [TS19], fapt ce conduce fie la un exces de  $NH_3$  cu eliberarea acestuia în mediu, fie la riscul de a nu elimina suficient  $NO_x$ .*

S-a constatat experimental, conform lui Guanyu Z., Xu L. și colaboratorii acestora, [XL07], [GZ10], că descompunerea și conversia din uree în  $NH_3$  nu este 100% eficientă. Astfel, din cauza unei descompuneri parțiale, rămâne uree nedescompusă care poate reacționa ulterior și forma depuneri de elemente secundare. În figura 1.19 poate fi urmărit mecanismul formării depunerilor solide, [FR24], în cazul injecției de AdBlue în tubulatura de evacuare a unui motor diesel.

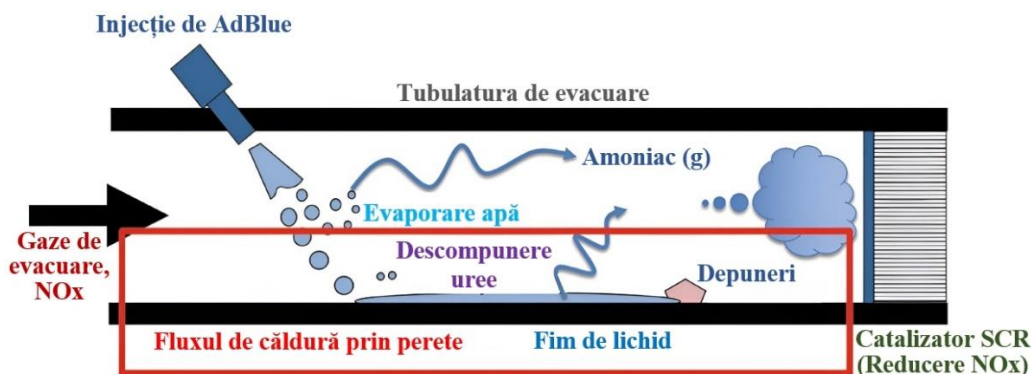


Fig. 1.19. Mecanismul formării depunerilor solide la injecția AdBlue în sistemul de evacuare, [FR24].

Există două tipuri de depuneri formate pe baza ureei în cadrul SCR:

- depunerile provenite de la uree și cele din subproduse rezultate în urma descompunerii, ultimele fiind mai dificil de eliminat, [AT19].
- depunerile formate când ureea se vaporizează din soluția de AdBlue, iar acumulările solide cristaline (adesea de culoare albă), se pot forma pe pereții conductei, [BA12], [ZH17].

Depunerile se pot topi ușor la temperaturi înalte ale gazelor de evacuare. Diferitele depuneri din subproduse se pot forma atunci când acidul izocianic ( $HNCO$ ) reacționează cu ureea. Cu toate acestea, [XL07], [BA12], [ZH17], principalele subproduse în acest context sunt biuretul (derivat al ureei, de culoare violet-purpurie), acidul cianuric ( $CYA$ ), amelida, amelina și melamina. Depunerile pot apărea în culori mai deschise sau maro, [ZH17], în funcție de tipul de depunere și de durata de funcționare a motorului.

*În funcție de temperatura gazelor de evacuare ale motoarelor diesel și, implicit, de condițiile de mediu, de regimul termic și de exploatare a motorului, se pot forma diferite subproduse ale depunerilor solide în cazul injecției de AdBlue.*

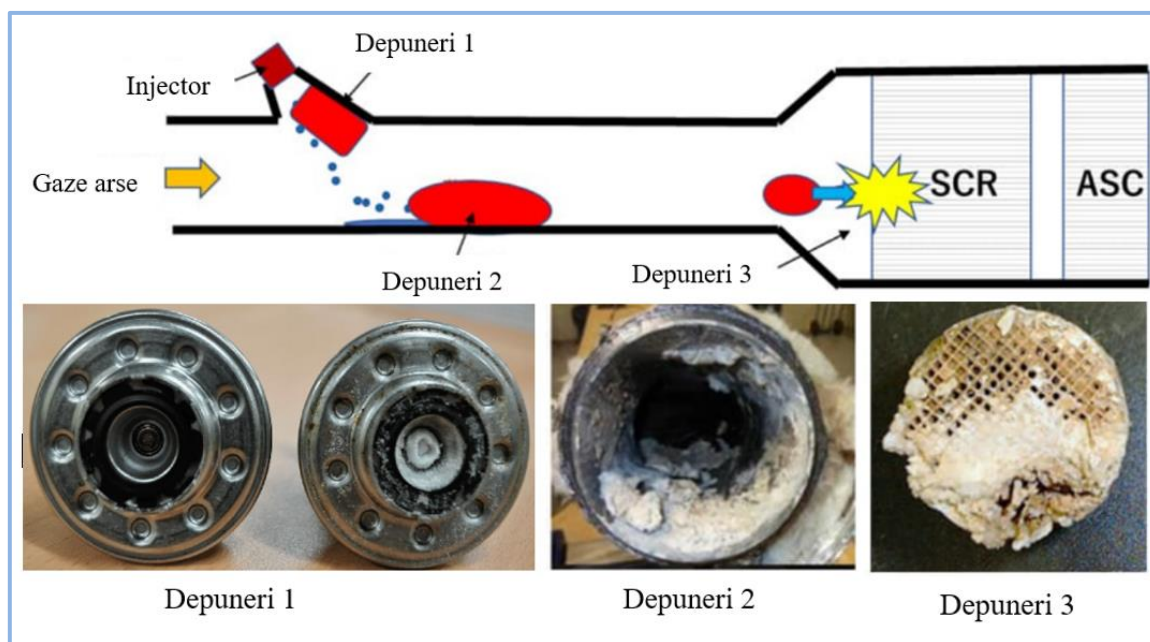
Aceste subproduse se pot acumula, [NI14], [TS19], și, astfel, pot:

- afecta performanța SCR, prin deteriorarea materialelor din componența acestuia cu efect direct asupra diminuării cantității de agent reducător;
- genera mai multe emisii datorate creșterii contrapresiunii în canalizația de evacuare aferentă motorului diesel;
- crește consumul de combustibil, fenomen care poate fi pus pe seama măririi rezistenței hidraulice pe traseul gazelor de evacuare, a regimului termic mai ridicat al motorului și a valorilor anormale furnizate de senzorii SCR către unitatea ECU a motorului.

*Reducerea eficienței sistemelor SCR este funcție de nivelul de temperatură a gazelor de evacuare la motoarele diesel, [SP04], [ZH17], [AT19] și va duce la o conversie mai scăzută a NOx, deoarece se furnizează mai puțin NH<sub>3</sub> în sistem.*

S-a constatat experimental, după cum se observă în figura 1.20, [SH14], [SK17\*], [SG19], că pot să apară trei categorii de depuneri solide la injecția de AdBlue:

- 1) **pe duza de injecție a injectorului** de AdBlue, fapt care poate determina obstrucționarea parțială a acestuia, având ca efect deteriorarea pulverizării;
- 2) **pe peretele sistemului de evacuare** a gazelor de ardere în avalul injectorului de AdBlue, cu efecte privind reducerea de NOx și a altor componente;
- 3) **pe zona frontală a catalizatorului** cu efectul acoperirii parțiale a canalizațiilor de curgere a microcanalelor fagurelui și, implicit, a curgerii prin SCR cu efect direct asupra diminuării eficacității catalizatorului.



**Fig. 1.20. Zona depunerilor solide la injecția de AdBlue în SCR, [SG19], [SH14], [XL07] și [AB22], [SK17\*].**

Depunerile solide pot cauza disfuncționalități la nivelul injectorului (depuneri 1), conform cercetărilor întreprinse de Shahariar G. H. ș.a., [SG19] și Smith H., ș.a., [SH14]. În mod similar, acumularea de depuneri în traseul gazelor de evacuare (conform [AB22]), (depuneri 2), nu doar deteriorează procesul de reducere a emisiilor de NOx prin blocarea picăturilor de AdBlue, ci și împiedică generarea uniformă de NH<sub>3</sub> în conducta de amestec.

O funcționare incorectă a injectorului AdBlue și sistemului SCR (depuneri 3), din cauza temperaturii de exploatare inadecvate, poate genera probleme la nivelul motorului diesel, prin creșterea contrapresiunii gazelor de evacuare. Creșterea contrapresiunii și lipsa curgerii adecvate a gazelor de evacuare (înfundarea canalizației de evacuare) este inadmisibilă în exploatarea motoarelor cu ardere internă, [XL07], [AB22]. Creșterea temperaturii de evacuare în acest caz poate provoca deteriorarea catalizatorului SCR din cauza impactului depunerilor și chiar a motorului diesel.

Din studiile și cercetările analizate rezultă că în afara condițiilor de injecție a AdBlue există și alți factori care pot influența formarea depunerilor de uree:

- **condițiile de exploatare ale motorului diesel:** includ o serie de parametri precum temperatura sistemului de răcire a motorului, temperatura mediului ambiant, temperatura de preîncălzire a gazelor de evacuare înaintea SCR, turația și sarcina

motorului etc. Exploatarea motorului diesel în aceste condiții poate genera cantități diferite de emisii de oxizi de azot (NO<sub>x</sub>). Totodată, conform cercetărilor efectuate, [ZH17], proprietățile fluxului de gaze de evacuare, temperatura gazului și debitul acestuia, pot crește riscul de apariție a depunerilor.

- *condițiile injectiei de AdBlue:* includ variabile precum cantitatea de uree dozată, frecvența dozării și calitatea pulverizării. Caracteristici precum dimensiunea picăturilor, viteza de injectare, unghiul jetului de AdBlue pot, de asemenea, influența riscul de formare a depunerilor, conform studiului efectuat de Zhang, H. și colaboratorii, [GZ10].

## 1.5 Obiectivele propuse pentru îmbunătățirea influenței temperaturii gazelor de evacuare asupra sistemelor SCR

O injectare defectuoasă a soluției de AdBlue sau în condiții propice apariției depunerilor solide, poate duce la depuneri excesive ale sărurilor pe suprafața tubulaturii de evacuare sau pe partea frontală a catalizatorului, fapt ce conduce la diminuarea eficacității sistemului SCR.

*Studiile și cercetările efectuate arată că motoarele diesel emit noxe în cantități mult mai mari, cu precădere în perioada funcționării la rece, fiind necesare sisteme de preîncălzire a gazelor de ardere înainte de SCR.*

*Până în prezent, au fost efectuate mai multe studii și cercetări privind diferite configurații ale sistemelor de purificare a gazelor de ardere la motoarele diesel, obținându-se diferite variante constructive. Aceste sunt încă în studiu.*

*Motoarele diesel sunt utilizate în prezent pe scară largă, estimându-se folosirea acestora și în viitorul apropiat, îndeosebi pentru mijloacele grele de transport.*

*Sunt necesare noi studii și cercetări pentru studiul preîncălzii gazelor de evacuare înaintea SCR, pentru creșterea gradului de atomizare a picăturilor injectate de AdBlue și pentru determinarea limitelor de temperatură care conduc la apariția depozitelor solide.*

Pornind de la cele constatate potrivit stadiului actual al cercetărilor privind implementarea SCR la motoarele diesel, se consideră necesar să se atingă următoarele obiective ale cercetării:

### ***Teoretice:***

1. ***Găsirea unor metode teoretice pentru creșterea eficienței catalizatorului SCR:*** luând în considerare dezvoltarea sistemelor SCR până în stadiul actual se propune identificarea și studierea factorilor de influență a temperaturii gazelor de evacuare a motoarelor diesel asupra eficientizării procesului de reducere a emisiilor de NO<sub>x</sub>, pentru găsirea unor soluții constructive mai eficiente, cu un cost mai scăzut și fiabilitate crescută;
2. ***Dezvoltarea teoretică a unor procedee de intensificare a atomizării picăturilor de AdBlue:*** găsirea unor principii care să conducă la conceperea și dezvoltarea unor sisteme destinate ameliorării atomizării picăturilor de AdBlue pentru autovehiculele echipate cu motoare diesel;
3. ***Modelarea matematică a transferului de căldură în prezența ultrasunetelor:*** dezvoltarea unor modele analitice de calcul pentru studiul transferului de căldură cu și fără preîncălzire, în cazul utilizării vibrațiilor ultrasonice necesare intensificării procesului de atomizare;
4. ***Dezvoltarea unui algoritm de calcul pentru vaporizarea picăturilor pe suprafețe sau în volumul gazelor de evacuare:*** conceperea unui cod de calcul pentru studiul



vaporizării picăturilor de AdBlue într-un mediu gazos de temperatură ridicată pe o suprafață plană sau în volumul gazelor de evacuare fierbinți;

5. **Dezvoltarea unui algoritm de calcul pentru transferul de căldură prin microcanalele catalizatorului:** conceperea unui cod de calcul și/sau realizarea de simulări pentru studiul transferului de căldură prin microcanalele catalizatorului SCR;
6. **Conceperea unui stand experimental pentru studiul pseudo-desublimării AdBlue și a formării depozitelor solide:** va permite studiul influenței temperaturilor asupra procesului de depunere a picăturilor de AdBlue pe suprafețe fierbinți, cât și studiul modului de aderare la suprafețe a depunerilor.
7. **Conceperea unui sistem de ejecție a vaporilor de AdBlue:** va servi transferului de masă al picăturilor de AdBlue atomizate în celule piezoelectrice obținute prin utilizarea efectului piezoelectric;
8. **Conceperea unui sistem magnetostrictiv pentru generarea de ultrasunete:** va permite intensificarea procesului de atomizare a picăturilor de AdBlue injectate pe o suprafață de forma unui disc supusă undelor ultrasonore;
9. **Stabilirea tehnicilor ce permit utilizarea calefacției:** găsirea unor metode teoretice de eliminare rapidă a formării peliculei de AdBlue la injecția soluției de AdBlue pe suprafețe.

#### **Aplicative:**

Scopul cercetărilor aplicative este de a minimiza cât mai mult posibil riscul de formare a depunerilor de uree în galeria de evacuare la autovehicule, în dependență de nivelul temperaturii gazelor de evacuare ale motorului diesel. În baza celor afirmate se va pune accent pe cercetarea experimentală care vizează metodele de intensificare a transferului de căldură și masă pentru a preveni formarea depunerilor de uree în sistemele de reducere catalitică selectivă (SCR) în timpul funcționării motorului diesel la temperatura lichidului de răcire, sub 333K (la rece).

Principalele obiective ale tezei de doctorat care vizează aspectele *aplicative*, sunt:

1. **Realizarea unui stand experimental care să permită studiul pseudo-desublimării** la adăugarea de AdBlue, în vederea eliminării condițiilor care conduc la apariția depunerilor sărurilor pe suprafețe fierbinți, cât și pentru studiul influenței temperaturii asupra cristalizării;
2. **Dezvoltarea unor sisteme de amestecare și transport de masă a picăturilor atomizate ale soluției de AdBlue:** se va realiza un sistem de ejecție care asigură o amestecare eficientă a picăturilor de AdBlue cu gazele de evacuare și transportul amestecului în amonte de catalizatorul SCR. Utilizarea soluției propuse va ajuta la prevenirea acumulării de depuneri solide și va maximiza procesul de reducere a emisiilor de oxizi de azot (NOx).
3. **Realizarea unui sistem de preîncălzire pentru creșterea eficienței conversiei NOx prin ridicarea temperaturii gazelor de evacuare:** se va dezvolta un sistem alcătuit dintr-un fagure metalic încălzit inductiv care îmbunătățește conversia NOx la pornirea la rece a motorului diesel (în primele minute), prin asigurarea unei temperaturi optime a gazelor de evacuare;
4. **Studierea pe cale experimentală a transferului de căldură în sistemele SCR:** constă în preluarea unor baze de date cu echipamente bazate pe platforma *Arduino*, senzori și software, pentru transferul de căldură în diferite zone ale tubulaturii de evacuare a motorului diesel. Studiul prin termoviziune al elementelor catalizatorului SCR și a zonelor învecinate, permite analiza influenței temperaturii asupra eficienței sistemului. Se va investiga impactul variației temperaturii asupra ratei de conversie a vaporilor de AdBlue și se va explora influența transferului termic în cazul utilizării undelor ultrasonore pentru îmbunătățirea atomizării soluției de AdBlue.

5. ***Efectuarea unor analize imagistice pentru studiul depunerilor din sistemele SCR:*** se va filma rapid (sau fotografia) apariția depunerilor care apar pe suprafețe pentru a se înțelege procesul de pseudo-desublimare și mecanismul de eliminare a acestui proces nedorit. Cu ajutorul microscopiei electronice va fi studiată morfologia depunerilor. Cu ajutorul filmărilor rapide se analizează impactul utilizării concentratoarelor magnetostriective sau celulelor piezoelectrice asupra intensificării procesului de atomizare a picăturilor de AdBlue. Tehnica de detectare în IR a câmpului de temperatură permite stabilirea punctuală a temperaturii în zona SCR.
6. ***Integrarea sistemelor dezvoltate și evaluarea eficienței diferitelor configurații:*** va urmări integrarea sistemului de ejecție și a sistemului de preîncălzire în diferite configurații funcționale pe un stand echipat cu motor diesel GTAT-T003&GTAT-T009, care va permite evaluarea eficacității și compatibilității acestora;
7. ***Efectuarea analizei gazelor de ardere pentru studiul influenței temperaturii asupra adiției de AdBlue:*** se pot face măsurători pe stand iar cu ajutorul trusei profesionale de măsurare a noxelor TESTO 300 NEXT LEVEL se determină NO<sub>x</sub>, NO, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> etc., cu sau fără adăugarea de AdBlue la diferite sarcini și turații ale motorului diesel pentru a clarifica care sunt condițiile optime de injectare necesare obținerii unei conversii eficiente a catalizatorului SCR;
8. ***Validarea rezultatelor obținute în cercetare și diseminarea rezultatelor:*** constă în compararea datelor experimentale obținute cu cele similare din domeniu și în publicarea unor articole în literatura de specialitate.

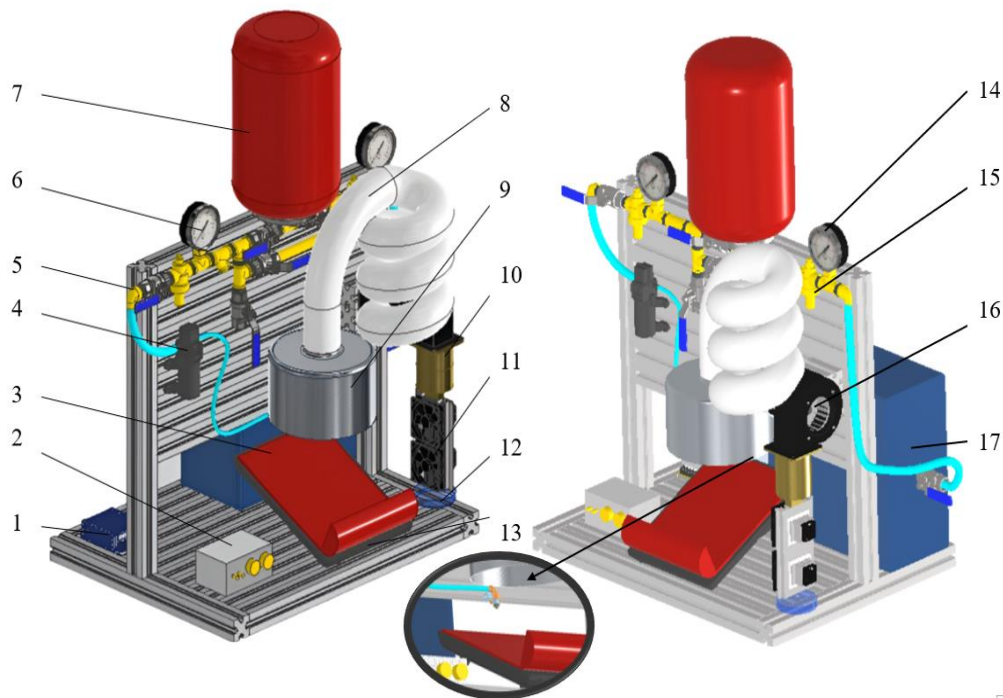
## 2. CONTRIBUȚII ADUSE LA IMPLEMENTAREA UNOR SOLUȚII CONSTRUCTIVE PENTRU CREȘTEREA EFICIENȚEI SCR

### 2.1 Conceperea unui stand pentru studiul pseudo-desublimării soluției de AdBlue

Pentru a studia procesul de injecție a soluției de AdBlue într-un sistem SCR, se propune o soluție constructivă care permite ca prin teste de laborator să demonstreze în ce condiții poate să apară fenomenul de pseudo-desublimare la contactului picăturilor cu o suprafață puternic încălzită. Un astfel de stand asigură:

- modificarea debitului de soluție injectată pe ciclu;
- modificarea periodicității timpilor de injecție;
- măsurarea temperaturii suprafeței pe care are loc injecția;
- măsurarea temperaturii soluției injectate de AdBlue;
- măsurarea dozei ciclice de soluție injectată;
- măsurarea cantității orare a soluției de AdBlue utilizată;
- filmarea rapidă a formării depunerilor;
- colectarea depunerilor și utilizarea microscopiei sau profilometriei laser pentru studierea depunerilor solide de săruri de AdBlue;
- condensarea vaporilor formați și analiza gradului de purificare a lichidului obținut prin condensare.

Schema conceptuală a standului și elementele sale componente pot fi urmărite în figura 2.1.



*Fig. 2.1. Stand experimental pentru studiul pseudo-desublimării picăturilor de AdBlue.*

Semnificația notațiilor din figura 2.1 este: 1- sursă de tensiune, 2 - modul electronic pentru controlul injecției soluției de AdBlue, care permite modificarea debitului și periodicității injecției, 3 - suprafață de testare încălzită prin inducție, care permite reglarea temperaturii, 4 - pompă soluție de AdBlue, 5 - robinet alimentare pompă de AdBlue, 6 - manometru pentru măsurarea presiunii de injecție a soluției de AdBlue, 7 - vas de expansiune, 8 - tub spiral condensator pentru colectarea vaporilor de AdBlue, 9 - hotă, 10 - rezervor captare vapori, 11 - modul Peltier de răcire a vaporilor, 12 – recipient de colectare a lichidului rezidual, 13 - sistem

reglabil de încălzire inductivă, 14 - manometre, 15 - regulator de presiune AdBlue, 16 - ventilator, 17 - rezervor AdBlue.

Soluția de AdBlue este preluată din rezervorul 17, după deschiderea robinetului 5 și trimisă prin intermediul pompei 4 către un injector (prezentat în detaliul în figura 2.1) la o presiune de  $5 \cdot 10^5 Pa$  reglată de regulatorul de presiune 15. Presiunea de lucru poate fi citită pe manometrul 14. Presiunea și debitul de substanță sunt stabilizate în instalație cu ajutorul vasului de expansiune 7.

Injectorul de AdBlue este controlat de o unitate electronică de control - UEC, concepută integral în cadrul laboratorului de *Motoare cu Ardere Internă* al *Facultății de Inginerie Mecanică Autovehicule și Robotică* din cadrul Universității Ștefan cel Mare din Suceava. Modulul de comandă și control a injecției de AdBlue notat cu 2, alimentat de la sursa 1, poate regla timpul între două injecții (periodicitatea injecțiilor) și cantitatea de soluție injectată (doza ciclică). Manometrul 6 măsoară presiunea din sistem. Jetul de AdBlue ajunge pe suprafața de testare 3, care poate atinge temperaturi cuprinse între cea a mediului ambiant și un maxim de 873K. Reglarea temperaturii suprafeței de testare se poate realiza prin intermediul plitei cu inducție 13. Hota 9, cu ajutorul ventilatorului 16, absoarbe vaporii formați prin vaporizarea soluției de AdBlue. Vaporii formați și captați în rezervorul 10, sunt aspirați într-un tub 8 care este răcit cu elementele Peltier, notate cu 11. Datorită efectului de răcire, vaporii condensează și apoi sunt colectați în recipientul 12 de colectare a lichidului rezidual.

În funcție de temperatura suprafeței de testare 3, a debitului de soluție de AdBlue și a periodicității injecției se pot determina experimental condițiile în care apare fenomenul de pseudo-desublimare care explică formarea depunerilor.

## 2.2 Contribuții aduse la implementarea unor soluții constructive pentru îmbunătățirea eficacității SCR

Din bibliografia studiată a reieșit că o fragmentare mai bună a jetului de AdBlue, conduce la un grad ridicat de atomizare a jetului și are efecte benefice asupra eficienței sistemului SCR. În acest sens, pentru îmbunătățirea eficacității sistemului clasic SCR, s-au conceput soluții pentru intensificarea transferului termic și de masă a SCR, în vederea asigurării creșterii conversiei chimice și îmbunătățirii transferului termic. Contribuțiile aduse vizează aplicarea metodelor:

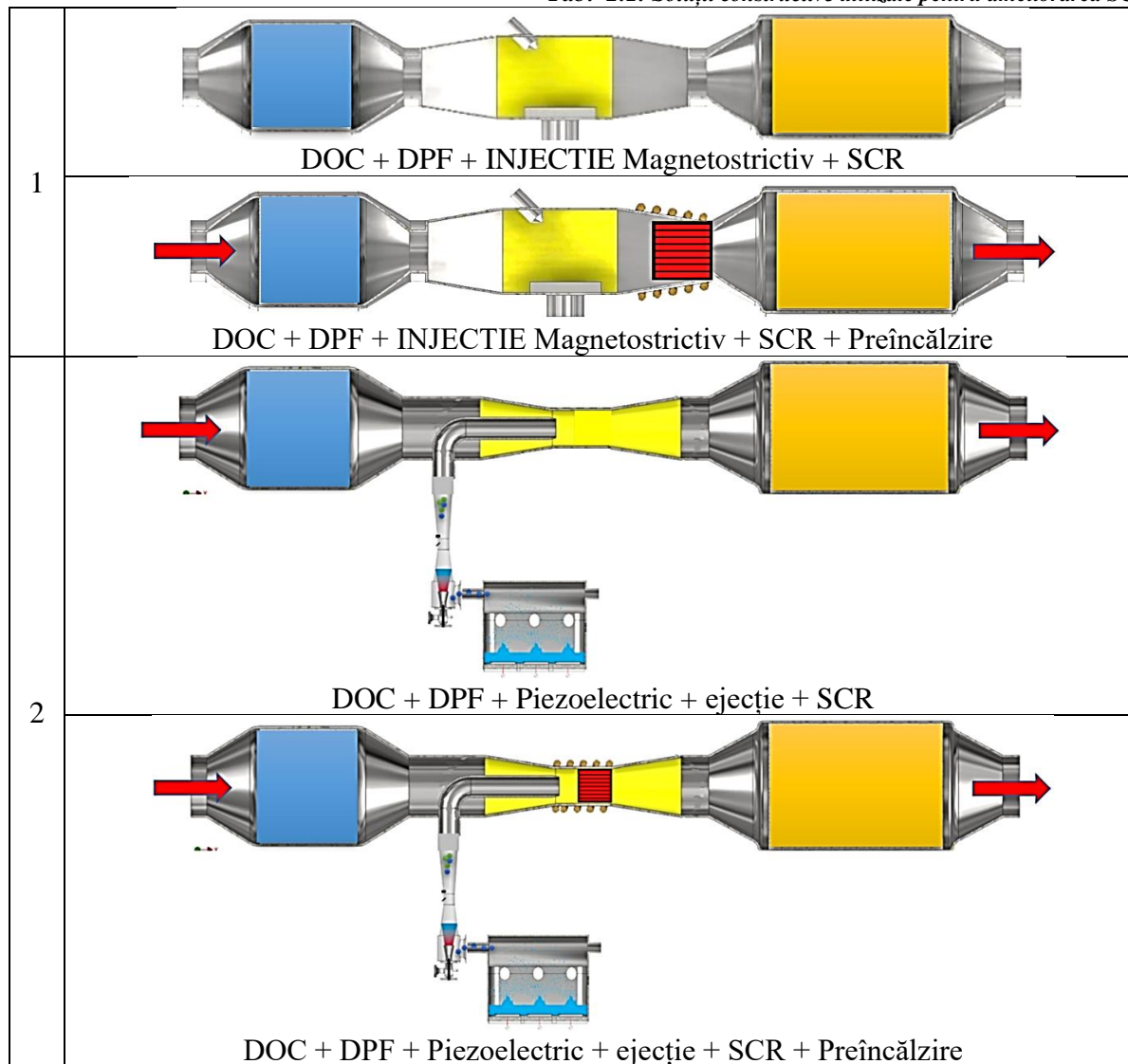
- **generarea ultrasunetelor folosind metoda magnetostrictivă**, care constă în folosirea vibrațiilor ultrasonice, generate de către un *concentrator magnetostrictiv*, asupra unui disc pe care se injectează AdBlue, pentru creșterea dispersiei picăturilor în fluxul de gaze de evacuare provenit de la motorul diesel. Tehnica propusă oferă posibilitatea atomizării puternice a jetului de AdBlue provenit de la un injector clasic, cu ajutorul ultrasunetelor generate magnetostrictiv;
- **utilizarea ultrasunetelor prin metoda piezoelectrică**, care constă în utilizarea unor celule piezoelectrice alimentate de un generator de frecvență. Celulele piezoelectrice sunt scufundate într-un vas plin cu soluție de AdBlue, obținându-se vaporii;
- **metoda ejecției** constă în modificarea sistemului SCR clasic prin introducerea unui ejector, care utilizează efectul Venturi. Alimentarea ejectorului se face cu aer comprimat sau gaze de ardere. Metoda face posibilă fie absorbția de AdBlue și atomizarea prin ejecție, fie antrenarea vaporilor de AdBlue în gazele arse generate prin efect piezoelectric;
- **preîncălzirea gazelor de evacuare** este utilizată atunci când lichidul de răcire al motorului este sub temperatura optimă de funcționare sau în cazul în care autovehiculul se deplasează pe distanțe scurte și motorul este rece. Până în stadiul actual s-au dezvoltat metode care încălzesc direct catalizatorul SCR. Se propune o nouă metodă de preîncălzire a amestecului gaze de evacuare - picături de AdBlue în

amonte de catalizatorul SCR, care constă în folosirea inducției termice. Sistemul de preîncălzire este amplasat direct în calea gazelor de evacuare considerate "reci" (el încălzește gazele nu fagurele catalizatorului).

*Metodele de mai sus pot fi utilizate cu sau fără preîncălzirea internă a gazelor de evacuare.*

Pornind de la metodele propuse (care reprezintă contribuțiile aduse), în tabelul 2.1 sunt prezentate soluțiile constructive utilizate în testele de laborator:

*Tab. 2.1. Soluții constructive utilizate pentru ameliorarea SCR.*



### 2.3 Implementarea unui ejector pentru dispersia și transportul picăturilor de AdBlue la SCR

Pentru evitarea formării depunerilor solide la adăugarea de AdBlue în SCR, se propun diverse metode de creștere a eficienței procesului de atomizare. În cazul jetului injectat putem crește dispersia picăturilor concomitent cu micșorarea diametrului acestora folosind un ejector. În cazul în care se utilizează metode de atomizare a picăturilor de AdBlue bazate pe principiul magnetostrictiv sau piezoelectric, ejectorul va fi utilizat ca un mijloc de transport a acestora în tubulatura sistemului SCR. Picăturile atomizate vor fi transportate în calea curentului gazelor arse fierbinți provenite de la motorul diesel, fapt care va contribui la creșterea dispersiei picăturilor, la vaporizarea mult mai rapidă a acestora și la transformarea rapidă în vapori.

Utilizarea ejectorului contribuie la creșterea eficienței SCR, întrucât catalizatorul va primi un flux uniform de vapori bine distribuit la suprafața frontală a acestuia.

Pentru atingerea acestor deziderate, s-a conceput un sistem de ejecție a vaporilor de AdBlue. După cum se cunoaște, [DD19], ejectorul funcționează pe principiul conversiei energiei cinetice a fluidelor, în presiune. Pentru SCR, ejectorul a fost astfel conceput încât să utilizeze energia gazelor de evacuare sau a unei surse de aer comprimat la autovehiculele grele. Constructiv, ejectorul creează o zonă de depresiune în interiorul său (în camera de amestec), care antrenează picăturile atomizate de AdBlue și le amestecă cu gazele de ardere, înainte ca amestecul format să intre în catalizatorul SCR. Amestecul rezultat ajunge în catalizator, unde reacționează chimic pentru a reduce NOx în azot și apă.

*Atomizarea transformă AdBlue în micropicături sferice, fapt care contribuie la mărirea suprafeței de contact a acestora cu gazele de ardere, fenomen care facilitează reacțiile de reducere catalitică selectivă din catalizatorul SCR.*

*Dispersia picăturilor atomizate de AdBlue cu ajutorul ejectorului, asigură distribuția mult mai uniformă a acestora în volumul amestecului picături-gaze de ardere, ceea ce conduce la creșterea eficienței catalizatorului SCR prin asigurarea unui debit constant de vapori la intrare.*

## 2.4 Conceperea unui element magnetostrictiv pentru fragmentarea jetului de AdBlue la SCR

Această metodă, nou propusă în tehnica exploatării SCR, constă în utilizarea unui concentrator magnetostrictiv, generator de ultrasunete. Gama de frecvențe a generatorului este cuprinsă între 20kHz și 40kHz, [SI02].

Schema de principiu a metodei de testare propusă pentru studiul efectului vaporizării cu ultrasunete, este prezentată în figura 2.5.

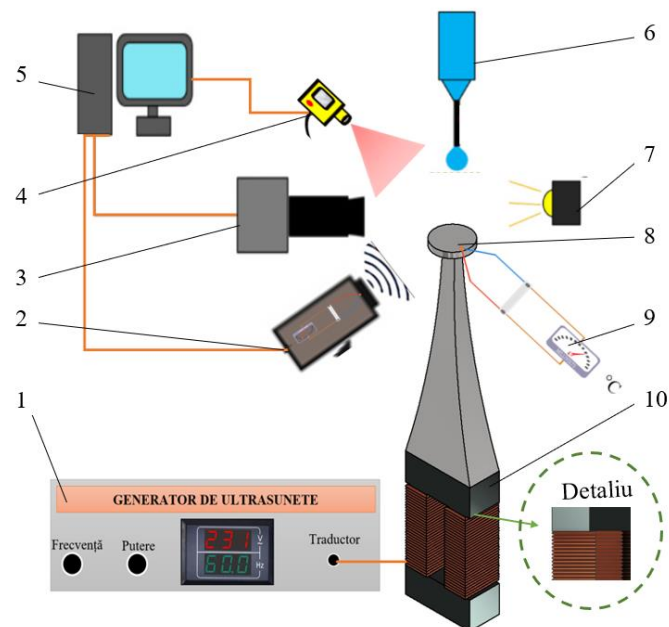


Fig. 2.5. Schema de principiu a metodei magnetostrictive.

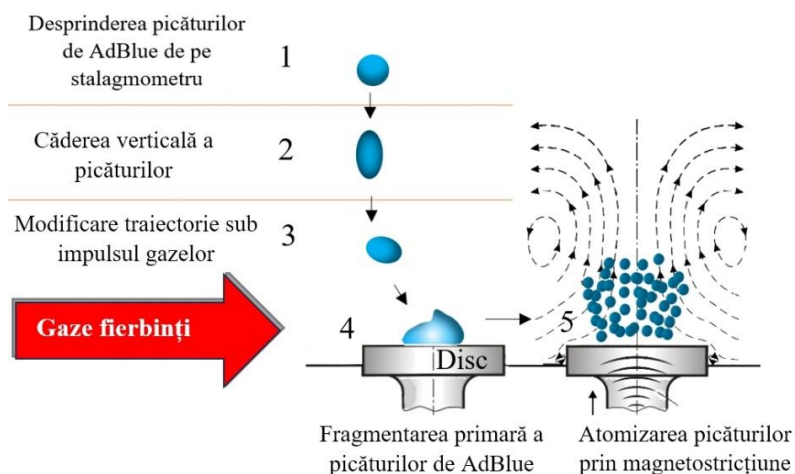
Semnificația notațiilor din figura 2.5 este: 1 - generator de ultrasunete, 2 - echipament achiziție și monitorizare temperatură, 3 - camera filmare de mare viteză, 4 - camera cu termoviziune, 5 - calculator, 6 - stalagmometru, 7 - sistem iluminare de mare putere, 8 - discul concentratorului magnetostrictiv, 9 - senzor de temperatură, 10 - concentratorul de frecvență.

La extremitatea superioară a concentratorului de frecvență 10 este fixat un disc 8, supus unor vibrații cu o intensitate de 20kHz, furnizate de generatorul de ultrasunete 1. Achiziția de



date este efectuată de către calculatorul 5, care preia imaginile procesate de către camera cu termoviziune 4 și camera de mare viteză 3. Temperatura gazelor de evacuare provenite de la motorul diesel, care trec peste discul 8, este măsurată cu echipamentul 2 care are încorporat un termistor. În partea de sus a imaginii este un stalagmometru 6, care permite controlul debitului de AdBlue pentru efectuarea testelor. Lampa 7 are rolul de a crește intensitatea luminoasă necesară camerei de mare viteză 3 pentru asigurarea rezoluției acesteia. Temperatura discului 8 este monitorizată de către senzorul de temperatură 9.

În figura 2.7 este prezentată schema fenomenologică a fragmentării picăturilor de AdBlue prin efect magnetostrictiv, în prezența unui câmp de temperatură. Picăturile de AdBlue se află în cădere și vor întâlni un disc plat, încălzit cu un flux de gaze fierbinți. Discul metalic este adus la temperaturi cuprinse între  $453\div 873K$ , prin convecție forțată.



**Fig. 2.7. Fragmentarea picăturilor de AdBlue, în câmp termic, prin magnetostricțiune, [PC23].**

Generatorul de frecvență transmite un câmp magnetic variabil unei concentrator feromagnetic de care este prins discul. Vibrațiile mecanice cu o frecvență de  $20kHz$  suscită concentratorul prin magnetostricțiune, [KD11], fapt care conduce la fragmentarea picăturilor de AdBlue. Întrucât se utilizează un concentrator magnetostrictiv, [TY11], se estimează că apare o directivitate ridicată, și că procesul de agitație moleculară începe instantaneu, formându-se deasupra discului un jet sau con de atomizare. Conform figurii 2.7 etapele care au loc sunt:

1. detașarea picăturilor de AdBlue de pe stalagmometru;
2. picăturile cad inițial prin gravitație perpendicular pe suprafața discului;
3. apare o curbare ușoară a traiectoriei picăturilor, dat fiind faptul că pe lângă gravitație acționează din lateral un flux de gaze fierbinți;
4. fragmentarea primară a jetului;
5. picăturile ajung la suprafața încălzită, [PC23], se formează un film subțire de lichid, iar asupra acestuia va acționa mediul ultrasonor care are ca efect fenomenul de "dezintegrare", motiv pentru care filmul se atomizează în picături mici. Rezultă nanopicături sferice, care dispersează pe întreaga suprafață a discului și în imediata apropiere.

Dacă se utilizează un astfel de sistem magnetostrictiv la un jet injectat de AdBlue se estimează că atomizarea jetului plus vaporizarea AdBlue face procesul conversiei catalitice mult mai eficace față de configurațiile actuale. Metoda poate fi aplicată cu succes mai ales în perioada tranzitorie de încălzire a motorului diesel, până la atingerea temperaturii de regim. Utilizarea metodei conduce și la apariția procesului de calefacție, care constă în vaporizarea intensă a picăturilor de AdBlue, la suprafața unui lichid aflat în imediata vecinătate a unui corp solid încins.

## 2.5 Contribuții aduse la implementarea elementelor piezoelectrice pentru generarea vaporilor de AdBlue

O altă metodă de interes pentru creșterea procesului de fragmentare a picăturilor de AdBlue constă în utilizarea unor elemente piezoelectrice, constituite sub forma unor celule ultrasonice de atomizare. Partea constructivă a celulelor piezoelectrice o constituie o lamelă din cuarț, pe fețele căreia sunt aplicate straturi ceramice subțiri, legată la o sursă de tensiune alternativă. Sub acțiunea câmpului electric alternativ, lamela piezoelectrică de cuarț începe să vibreze în dependență de frecvența aplicată.

În figura 2.12 este prezentat detaliat mecanismul generării picăturilor atomizate de AdBlue.

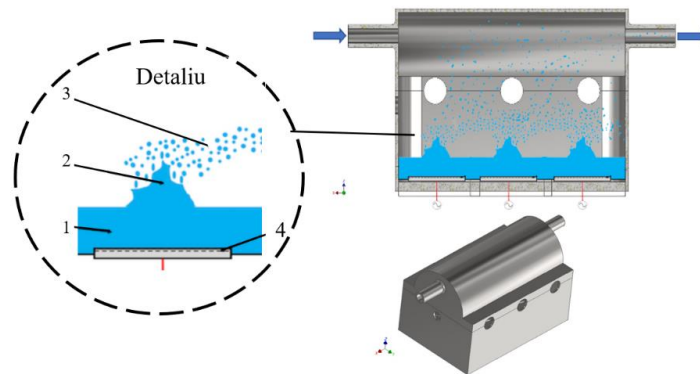


Fig. 2.12. Generarea picăturilor de AdBlue folosind celule piezoelectrice.

Semnificația notațiilor din figura 2.12 este: 1 - soluția lichidă de AdBlue, 2 - con de atomizare, 3 - picături atomizate de AdBlue în curs de vaporizare, 4 - celule care conțin elemente piezoelectrice.

Elementele piezoelectrice 4 imersate în soluția de AdBlue, datorită oscilațiilor induse cu o frecvență de ordinul kHz-ilor, formează un con de atomizare 2, poziționat axial față de cristalul de cuarț. Efectul de electrostricțiune, [PC10], apare datorită unei diferențe sinusoidale de potențial, furnizată de generatorul de ultrasunete. În zona conului de atomizare se desprind micropicături, formându-se deasupra lichidului o aglomerare foarte fină de picături de AdBlue (3), asemănătoare ceții. Aceste micropicături vor fi antrenate în mișcare către centrul tubulaturii de evacuare a gazelor de ardere, prin efect Venturi.

Schema bloc pentru configurația propusă este prezentată în figura 2.13.

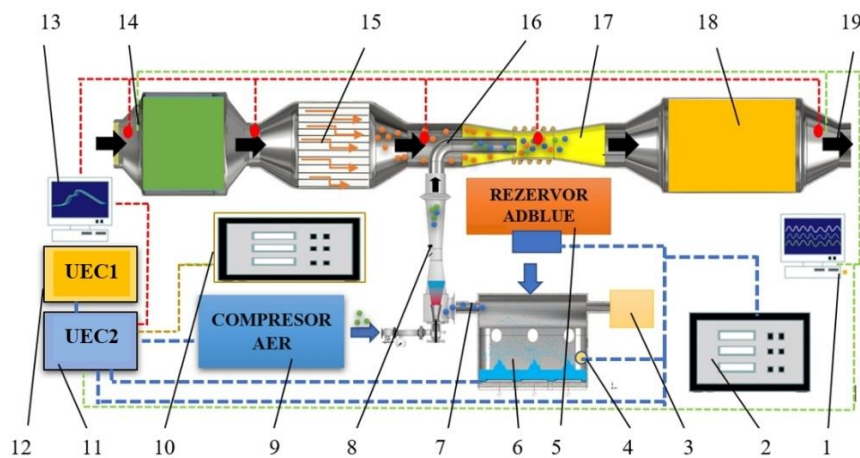


Fig. 2.13. Elementele componente ale sistemului piezoelectric de atomizare a SCR prin eiecție.

Semnificația notațiilor din figură este: 1 - analizor de gaze pentru monitorizarea parametrilor gazelor arse (implicit a NOx) după SCR, 2 - interfață achiziție de date, 3 - supapă, 4 - senzor de nivel, 5 - rezervor AdBlue, 6 - camera de acumulare a vaporilor, 7 - racord



aspirație, 8 - ejector, 9 - compresor de aer, 10 - afișaj, 11 - unitatea electronică de control AdBlue UEC2, 12 - unitatea electronică de control UEC1 a motorului diesel, 13 - sistem de achiziție a datelor, 14 - catalizatorul DOC, 15 - DPF, 16 - difuzor sistem ejecție, 17 - tub Venturi, 18 - SCR, 19 evacuare.

Aplicarea variantei propuse de atomizare a picăturilor cu celule piezoelectrice, are avantajele:

- asigură transformarea rapidă a lichidului direct în micropicături, remediindu-se dezavantajele injecției de AdBlue;
- metoda propusă elimină posibilitatea formării filmului de lichid de AdBlue pe suprafața tubulaturii de evacuare;
- intensifică transferul termic, întrucât suprafața de contact dintre gazele de ardere și picăturile atomizate de AdBlue crește, grație numărului mai mare de picături sferice;
- crește eficiența conversiei chimice a SCR prin uniformizarea și dispersia mai mare a picăturilor atomizate în gazele de ardere ale motorului.

## 2.6 Contribuții aduse în implementarea unui sistem de preîncălzire a gazelor de evacuare, înaintea SCR

Sistemele de preîncălzire dezvoltate până în prezent sunt utilizate cu precădere pentru încălzirea directă a catalizatorului SCR. Sistemul propus în cadrul acestui studiu are la bază un modul de preîncălzire a gazelor de ardere înaintea SCR, format dintr-o bobină inductivă, care funcționează pe seama inducției electromagnetice. Sistemul de preîncălzire poate fi utilizat în mai multe configurații, prezentate în figurile 2.14-2.16.

Prima configurație corespunde unui SCR clasic, cu injecție de AdBlue controlat electronic implementat pe un motor diesel, fără ca acesta să fi avut în dotare (constructiv) un astfel de sistem.

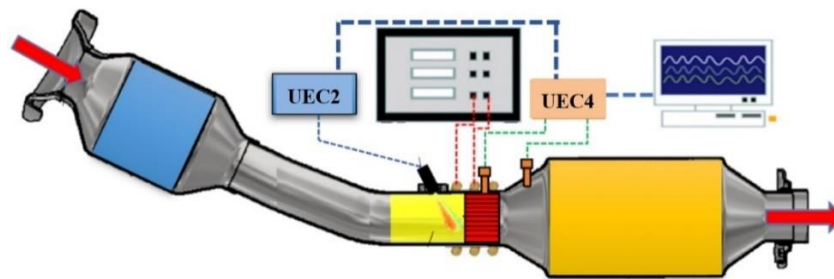


Fig. 2.14. Sistem de preîncălzire, configurația SCR clasic.

Sistemul propus implică introducerea preîncălzirii în aval de injectorul soluției de AdBlue și în amonte de SCR. Preîncălzirea are loc inductiv cu ajutorul unui dispozitiv special conceput, care să permită trecerea și încălzirea suplimentară a gazelor de evacuare din motorul diesel. Unitatea electronică de comandă 4 a sistemului de preîncălzire, notată în figură ca UEC4, comunică cu unitatea electronică de comandă a motorului, UEC2 astfel încât, la punerea contactului de pornire a motorului, va începe procesul de preîncălzire.

În figura 2.15 este prezentat cazul preîncălzirii cu element magnetostrictiv.

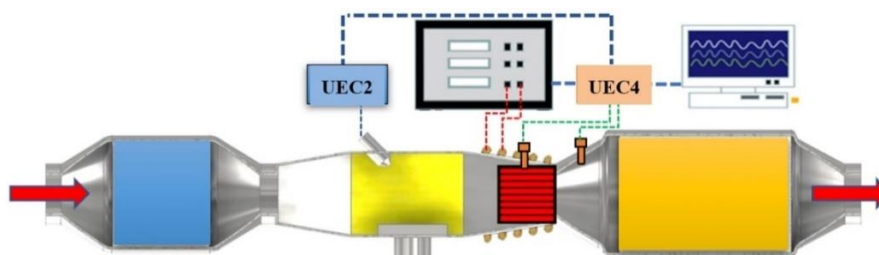


Fig. 2.15. Sistem de preîncălzire, configurația SCR cu element magnetostrictiv.

Din figura 2.15 reiese că în instalație, pe lângă DPF și SCR, se introduce central un element magnetostrictiv, care asigură atomizarea jetului de AdBlue injectat. După atomizare se utilizează sistemul de preîncălzire prin inducție.

În figura 2.16 s-a reprezentat structura unui sistem de preîncălzire propus pentru configurația cu ejector pentru aspirarea picăturilor atomizate prin efect piezoelectric.

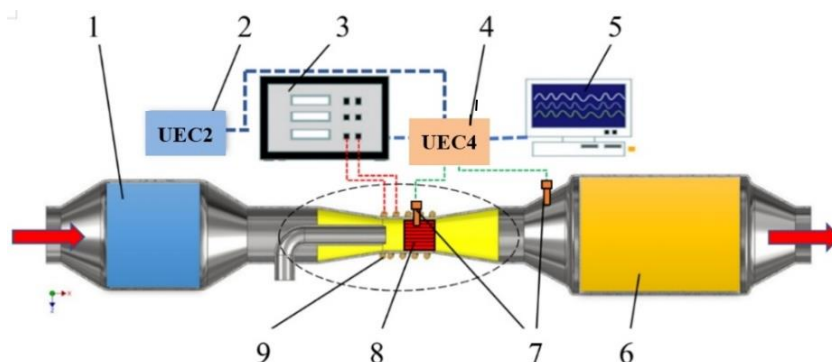


Fig. 2.16. Sistem de preîncălzire propus pentru configurația SCR cu ejector.

Gazele de evacuare provenite de la motorul termic ajung în filtrul DPF 1 la o temperatură  $T_1$ . La ieșirea din DPF, gazele de ardere vor suferi o răcire ușoară datorată pierderilor de căldură convective, temperatura gazelor ajungând la valoarea  $T_2$ . Aceste scăderi de temperatură reduc eficiența procesul de conversie chimică din SCR-ul notat cu 6. Pentru creșterea eficienței SCR se propune introducerea unui fagure metalic 8 care este încălzit prin inducție de către bobina 9. Bobina este alimentată de la invertorul 3 comandat de către unitatea electronică de comandă UEC4 care monitorizează temperatura prin intermediul senzorilor 7. Primul senzor monitorizează temperatura locală a bobinei de inducție având și rolul de protejare a sistemului de preîncălzire. Un al doilea senzor este poziționat în amonte de SCR pentru a monitoriza valoarea temperaturii după încălzirea gazelor de către preîncălzitor. Senzorii 7 furnizează datele temperaturilor măsurate, la unitatea electronică de control UEC4 care va asigura pornirea și oprirea instalației de preîncălzire în funcție de necesitate. În cele din urmă, amestecul gaze de ardere - picături atomizate va avea o temperatură  $T_3$  mai ridicată decât temperatura  $T_1$  de intrare. Toate cele trei soluții propuse utilizează o aceeași logică de funcționare, comandă și control.

Figura 2.17 reprezintă în secțiune sistemul de preîncălzire conceput.

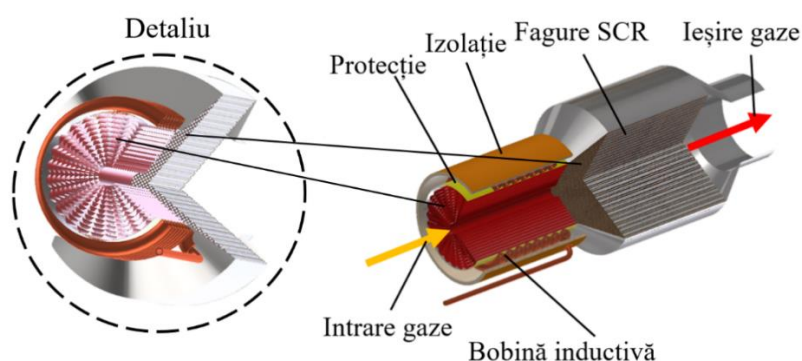


Fig. 2.17. Secțiune și detalii ale sistemului de preîncălzire.

De obicei, un încălzitor cu inducție cuprinde trei componente principale, și anume: electronica de putere, electronica de control și bobina de inducție.

În cazul pornirii la rece a vehiculului, bobina de inducție este activată pentru o perioadă limitată (de exemplu, 60s), cu scopul de a asigura încălzirea gazelor de ardere care ies din filtrul de particule DPF. Astfel, [AA99], injecția de AdBlue are loc într-un mediu care atinge o temperatură de peste 453K, când are loc o conversie chimică favorabilă.

Sistemul de preîncălzire prin inducție are avantajul oferirii unei încălziri rapide a amestecului, estimată a fi de ordinul milisecundelor, acțiune esențială pentru reducerea timpului aferent pregătirii sistemului SCR pentru a funcționa optim.

Bobina de inducție poate fi controlată cu precizie pentru a menține gazele de ardere la temperatura necesară.

Sistemul de încălzire inductiv a fost astfel conceput încât să încălzească amestecul în amonte de SCR.

Cercetările efectuate de Dey S., ș.a., [DS23], prezintă o metodă de încălzire prin inducție a convertizorului catalitic. Prin această metodă se încălzește substratul fagurelui și gazul care curge în timpul pornirii la rece, reducându-se timpul de atingere a temperaturii de conversie a SCR. Sistemul propus de Dey S., ș.a., [DS23] este prezentat în figura 2.20-a, iar varianta de preîncălzire propusă de autor este cea din figura 2.20-b.

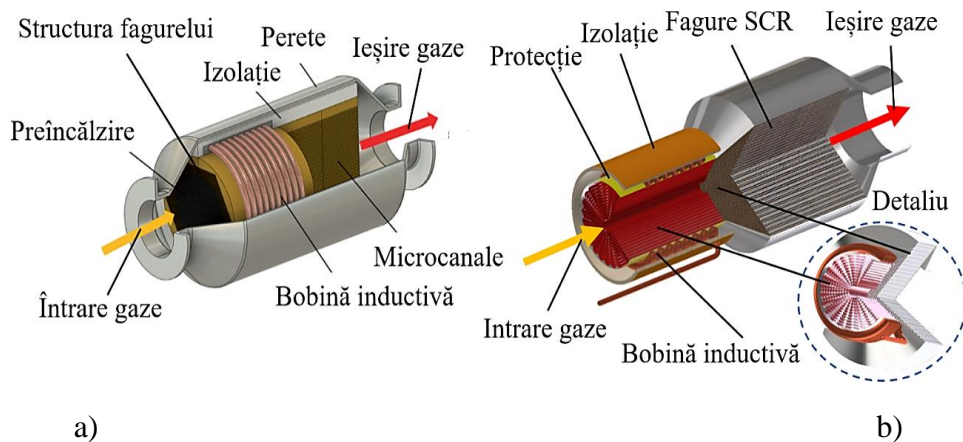


Fig. 2.20. Compararea între sistemul de preîncălzire: a) propus de Dey S ș.a. [DS23] și b) cel propus de Picus.

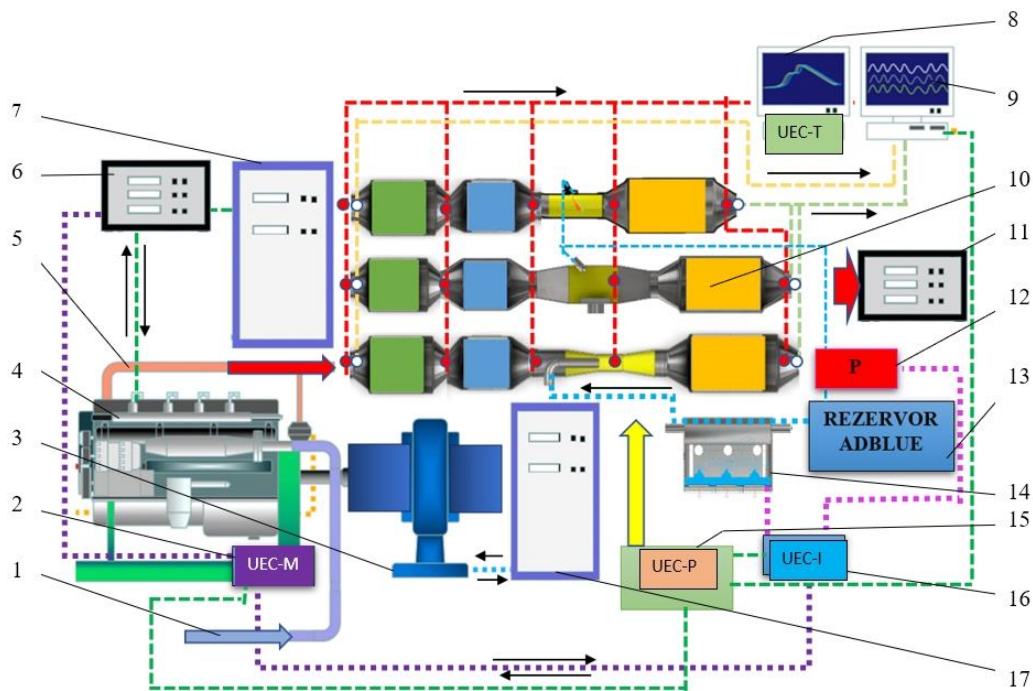
În cazul sistemului de preîncălzire propus, bobina de inducție este montată în exteriorul tubulaturii de evacuare, în amonte de zona de injecție a AdBlue. Se consideră că acest montaj are avantajele:

- asigură preîncălzirea amestecului gaze de evacuare - picături de AdBlue, fapt ce permite intensificarea transferului de căldură convectiv;
- asigură o dispersie mai mare a vaporilor formați prin creșterea ratei de vaporizare a picăturilor de AdBlue;
- crește efectul difuziv în transferul de căldură;
- permite prin concept o protejare a fagurelui SCR la supraîncălzire;
- elimină riscul degradării convertizorului catalitic prin șocuri termice repetate ale ciclurilor încălzire - răcire;
- sistemul propus este detașabil și ușor de înlocuit;
- spațiul dintre preîncălzitor și SCR este suficient de mare încât să permită difuzia vaporilor în toate microcanalele fagurelui catalizatorului;
- soluție constructivă simplă, ușor de aplicat pe orice instalație SCR cu modificări minore.

## 2.7 Configurația standului experimental și echipamentele de măsură utilizate

Strategia de cercetare s-a realizat pornind de la obiectivele tezei de doctorat, urmărind cu precădere ca determinările experimentale să aibă loc pe un stand complet echipat.

Schema de principiu a standului experimental este dată în figura 2.21.



**Fig. 2.21. Schema standului motor diesel - sistem de frânare, echipat cu SCR în diverse configurații**

Semnificația notațiilor este: 1 - colectorul de admisie, 2 - unitatea electronică de control UEC-M, 3 - frână dinamometrică, 4 - motor diesel, 5 - colectorul de evacuare a gazelor arse, 6 - calorimetru cu afișaj electronic (în dotarea standului), 7 - panou de măsură și control (în dotarea standului experimental), 8 - unitate electronică de control cu Arduino și achiziție a temperaturii UEC-T, 9 - laptop achiziție date de la analizorul de gaze de ardere, 10 - configurații SCR, 11 - analizor gaze de ardere, 12 - pompă de AdBlue, 13 - rezervor soluție de AdBlue, 14 - cameră generare de vapori cu sistem de ejecție, 15 - unitate electronică de control a preîncălzirii UEC-P, 16 - unitate electronică de control a injecției de AdBlue UEC-I, 17 - unitate electronică achiziție de date de la motor și frâna dinamometrică cu interfață RS485.

În schemă sunt prezentate componentele necesare experimentelor, echipamentele de măsură și control cât și variantele constructive ale diferitelor configurații propuse pentru SCR. Pentru acuratețea datelor experimentale s-au utilizat pe cât posibil echipamente de laborator omologate. Achiziția de date s-a realizat cu ajutorul unor interfețe specializate asistate de softuri dedicate. Standul experimental include un motor diesel 4 montat pe un cadru metalic, care are incluse colectorul de admisie 1 și de evacuare 5. Sistemul de admisie al motorului diesel include un debitmetru de aer pentru măsurarea precisă a cantității de aer care intră în motor. Motorul diesel este controlat printr-o unitate electronică de comandă UEC-M notată cu 2. Fluxul de gaze de evacuare este trimis într-un calorimetru 6, unde va încălzi apa rece provenită de la un rezervor. Se obțin astfel patru temperaturi, intrare ieșire gaze de ardere și intrare apă rece de alimentare și ieșire apă caldă din calorimetru. Datele obținute sunt folosite pentru bilanțul termic al motorului cu ardere internă.

Cu ajutorul unei unități electronice de monitorizare a temperaturii UEC-T, notată cu 8, se pot achiziționa datele în diferite puncte de interes ale SCR cu ajutorul unui laptop 9. Monitorizarea compoziției și temperaturii gazelor de ardere (în zona de prelevare) se realizează prin intermediul unui analizor de gaze 11. Analizorul dispune de o unitate electronică de control care permite vizualizarea în timp real a anumitor grafice dar și stocarea datelor. Configurațiile propuse pentru SCR notate cu 10 sunt pentru: SCR clasic cu injecție, SCR cu sau fără preîncălzire folosind concentrator magnetostrictiv sau principiul piezoelectric. Pentru alimentarea cu AdBlue este prevăzută o pompă 12 care generează o presiune de 5 bari, care preia soluție din rezervorul 13.



## 3. TRANSFERUL DE CĂLDURĂ ȘI MASĂ ÎN SISTEMELE DE REDUCERE CATALITICĂ SELECTIVĂ

### 3.1 Introducere

În cadrul sistemelor SCR, transferul de căldură trebuie gestionat eficient pentru a asigura o temperatură optimă în interiorul catalizatorului, care să permită desfășurarea cât mai completă a reacțiilor chimice. Procesul de transfer de căldură în SCR are diferite componente, precum cea convectivă, conductivă, radiativă sau difuzivă care implică absorbția căldurii din gazele de evacuare sau dintr-o sursă exterioară de căldură și disiparea acesteia către zona de conversie chimică (în volum) sau către alte componente (pe suprafețe).

*Temperatura gazelor la sfârșitul procesului de evacuare, conform lui Rakosi E. ș.a. [RE07], în cazul ciclului unui motor diesel cu ardere rapidă este cuprinsă între 700÷800K. Temperatura înaintea catalizatorului SCR, conform [BK18], se încadrează între 400÷800K, întrucât o parte a căldurii se pierde pe traseu. Conform studiilor efectuate de diverși autori, [AA99], [JH04], [KC12], [AM15], există un interval optim pentru temperatura necesară descompunerii ureei în SCR, cuprins între 453÷723K.*

Prin urmare, este necesar ca la regimuri variabile de funcționare ale motorului, să se asigure un transfer de căldură adecvat în sistemul SCR, pentru a se menține o aceeași temperatură optimă a fagurelui catalizatorului. În ceea ce privește transferul de căldură și reacțiile fizico-chimice din zona de injecție a AdBlue și din catalizatorul SCR, este esențial să înțelegem modul în care aceste procese influențează eficiența sistemului pentru a se reduce emisiile de oxizi de azot din gazele de evacuare ale motoarelor diesel. O deosebită importanță pentru calcule o are diametrul picăturilor injectate de AdBlue. Majewski W.A., [MA23], arată că sistemele de dozare trebuie să asigure injectarea unei cantități cât mai exacte de uree pentru asigurarea eficacității reacțiilor din SCR și o amestecare uniformă a ureei și amoniacului cu gazele de evacuare. O cât mai bună atomizare a picăturilor de uree injectate (dimensiuni mai mici), permite o conversie mai completă în amoniac și poate reduce la minimum riscul de murdărire cu depozite solide. Injectoarele de uree produc picături de 30÷100 $\mu$ m, exprimate ca diametru mediu Sauter (SMD). Picăturile sub 10 $\mu$ m pot fi utile pentru a minimiza depunerile în sistemele SCR destinate să asigure o reducere susținută a NO<sub>x</sub> la temperaturi de până la 423÷473K.

Transformările termodinamice ale soluției de AdBlue în interiorul sistemului SCR în procesul de conversie a NO<sub>x</sub>, diferă în funcție de zona de lucru.

- La injecția soluției de AdBlue pe suprafețele fierbinți ale sistemului de evacuare apare o transformare de fază după atingerea temperaturii de saturație, și anume, vaporizarea. Dacă temperatura suprafeței este mult peste cea de saturație, la injecția de AdBlue pe suprafețe apare pseudo-desublimare, care decurge cvasi-instantaneu.
- În cazul micro-picăturilor de AdBlue antrenate în mișcare de curentul de gaze de ardere fierbinți, vaporizarea decurge în volum, caz în care apar fenomenele de tip convectiv, caracterizate prin transport de masă și intensificarea difuziei termice.
- În urma injecției soluției de AdBlue, picăturile lichide suportă o transformare bifazică, printr-un ciclu continuu de transfer de masă până la intrarea în fagurele SCR.

### 3.2 Contribuții aduse la determinarea analitică a temperaturii picăturii de AdBlue injectate în volumul gazelor de evacuare ale SCR, fără considerarea fenomenului difuziv

Pentru a evidenția cum este influențat randamentul sistemelor SCR la injecția AdBlue, este necesar să se studieze modul în care temperatura gazelor de evacuare influențează:

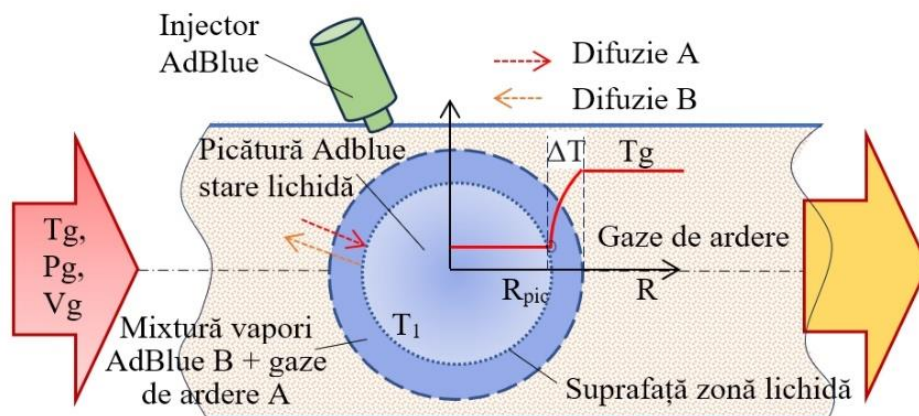
- formarea vaporilor în cazul picăturilor de AdBlue care se deplasează într-un mediu gazos de temperatură ridicată (injecție într-un volum de gaze) cu sau fără difuzie termică;
- procesul de vaporizare la injecția picăturilor de AdBlue pe suprafețe fierbinți (injecție pe suprafețe);
- mecanismul de formare a depunerilor solide de AdBlue în zona injectorului și la suprafața frontală a fagurelui catalizatorului SCR.

Studiul transferului de căldură între particulele de AdBlue și gazele arse din galeria de evacuare a motorului diesel, permite prin modelul matematic adoptat să se considere ca mărimi variabile: diametrul picăturii, temperatura picăturii, a mediului ambiant, a gazelor de evacuare și densitatea. Fenomenele de transfer termic specifice acestui caz sunt caracterizate de procese termo-gazodinamice complexe, care diferă fundamental față de cazul în care fazele se află într-un amestec (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.

Este necesar să se cunoască care sunt factorii de influență asupra particulei lichide de AdBlue 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. Se urmărește determinarea modului de evoluție a parametrilor termofizici corespunzători mediului bifazic, în dependență de viteza de curgere a fazei gazoase.

*Pentru creșterea eficienței sistemelor SCR este recomandat ca picăturile injectate să fie cât mai mici astfel încât acestea să nu pătrundă în stare lichidă în fagurele SCR, ci sub formă de vapori.*

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, [GC10], [KK13], [TK17], 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, de ecuația de continuitate și legea conservării energiei. Se consideră în figura 3.1 tubulatura de evacuare reprezentată schematic în care sunt incluse procesele termofizice ale unei picături de lichid care se evaporă într-un mediu gazos.



**Fig. 3.1. Procesele termofizice ale unei picături de lichid care se evaporă într-un mediu gazos.**

Se iau în considerare parametrii mediului bifazic alcătuit din picături de AdBlue care se evaporă în timp ce se deplasează printr-un mediu gazos izotermic. Se poate observa că gazele de evacuare intră în zona de injecție cu o temperatură inițială  $T_g$ , presiunea  $P_g$  și viteza  $V_g$ . La contactul unei picături de AdBlue cu gazele fierbinți, la interfață se formează un strat pelicular format din mixtură de vapori de AdBlue cu masa moleculară B care interacționează cu gazele

de ardere A prin difuzie. Schimbul difuziv între cele două substanțe are loc bidirecțional, atât de la picătura de lichid către gazele de ardere, cât și invers (săgețile roșii). Variația temperaturii fazei lichide în timp, ca urmare a schimbului termic interfazic, are la bază relația:

$$T_l = T_g - (T_g - T_{PAD}) \cdot \exp\left(-\frac{6\lambda_g (2 + 0,6Re^{0,5} P_r^{0,333})}{\rho_{AD} C_{PAD} d_{PAD}^2} x\right), \quad (3.12)$$

unde:  $T_g$  [K] - temperatura gazelor de evacuare,  $T_{PAD}$  [K] - temperatura picăturilor de AdBlue,  $\tau$  [s] - timp,  $C_{PAD}$  [J/kgK] - căldura specifică la presiune constantă.

Această relație permite calculul temperaturii fazei lichide funcție de spațiul străbătut de picături într-un mediu gazos de temperatură ridicată, considerând mediul bifazic, fără a se lua în considerare fenomenul de difuzie termică. În urma calculului efectuate, s-a obținut un calcul realizat în MathCad, prezentat în ANEXA 1. Folosind datele de calcul obținute pe cale analitică, s-au trasat reprezentările din figura 3.2.

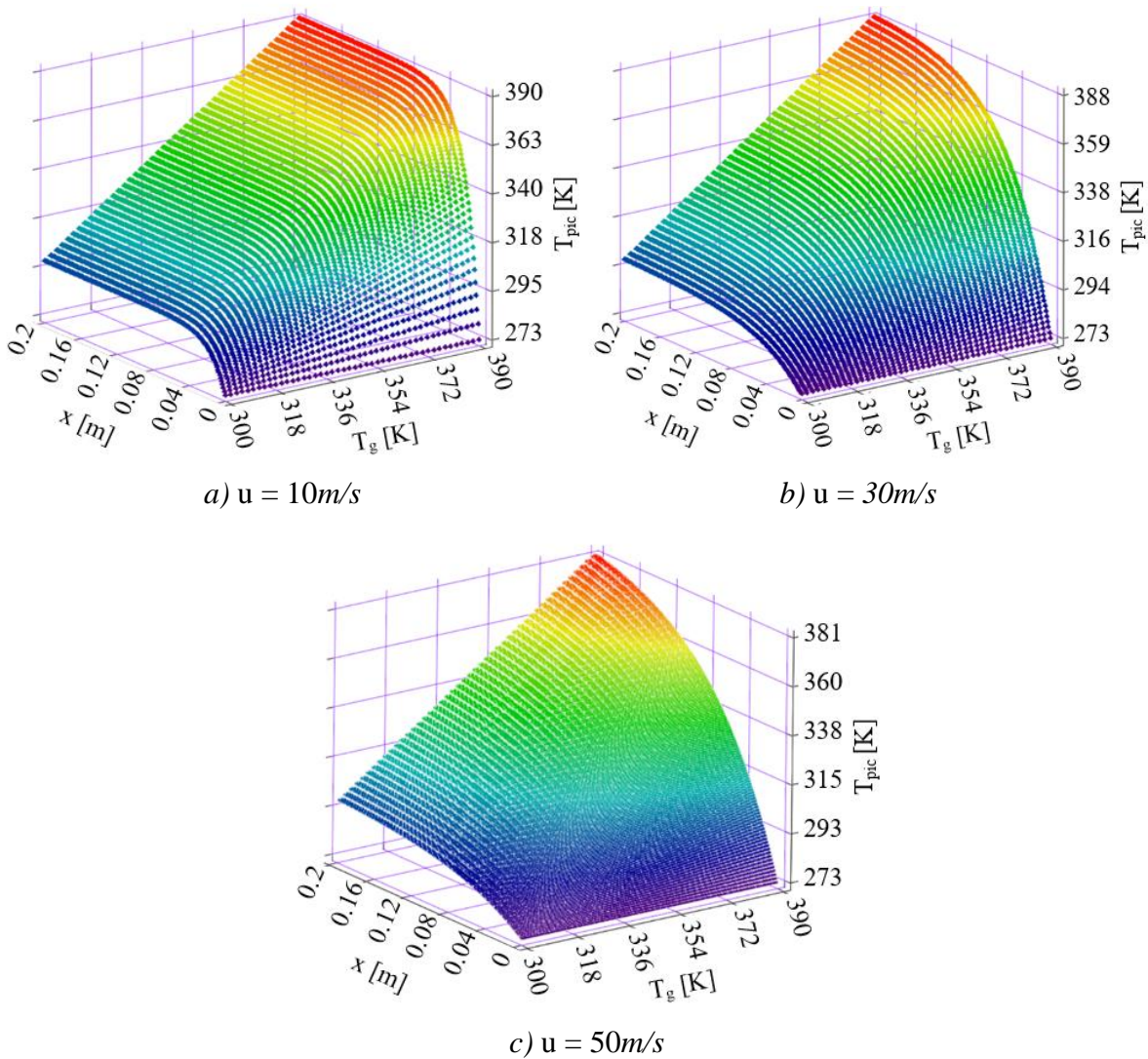


Fig. 3.2a-c. Temperatura picăturilor de AdBlue cu spațiul străbătut și temperatura gazelor de evacuare la vitezele de deplasare  $u$ : a) 10m/s, b) 30m/s și c) 50m/s.

Graficele din figura 3.2 sunt trasate în coordonate tridimensionale pentru variația temperaturii picăturilor  $T_{pic}$  [K] cu temperatura gazelor de evacuare  $T_g$  [K] cuprinsă între 300-390K. Spațiul străbătut de jet este notat în figură cu  $x$  [m] și atinge 0,2m. Calculele au fost efectuate pentru diferite viteze ale jetului 10, 30, 50m/s notate pe fiecare figură. Analizând rezultatele obținute se constată că temperatura picăturilor de AdBlue care străbat o lungime de 0.2m este dependentă de temperatura gazelor de evacuare și de viteza acestora. Temperatura fazei lichide este influențată de temperatura mediului în care are loc vaporizarea, dimensiunea inițială a picăturilor de lichid, spațiul parcurs și viteza instantanee a picăturilor de lichid. Se întâlnesc două situații.

Prima situație apare atunci când gazele de evacuare sunt reci și nu ating temperatura de regim. Această situație este specifică pornirii motorului la rece până la atingerea unor temperaturi inferioare (egale) valorilor de saturație ale soluției de Adblue. Se poate aprecia că picăturile de AdBlue se apropie de temperatura de saturație și ating această valoare dacă temperatura gazelor de evacuare este mai mare cu 10 -15K.

A doua situație corespunde cazului în care picăturile de AdBlue sunt injectate în tubulatura de evacuare într-un mediu gazos aflat la temperaturi mult mai ridicate decât temperatura de saturație.

Din cele trei figuri se observă că se atinge temperatura de saturație marcată cu roșu, la diferite valori ale parametrilor de exploatare. Deși parametrii soluției de AdBlue indică o valoare de 373,15K pentru temperatura de saturație, calculele arată că pot să apară uşoare depășiri ale acestei valori, puse pe seama presiunii coloanei de gaze de ardere evacuate. Este cunoscut faptul că la motoarele supraalimentate diesel, presiunea pe coloana de evacuare, [RE07], poate atinge  $p_r = (0,75... 0,98)p_s$ , unde  $p_s$  este presiunea de supraalimentare.

Modelul de calcul adoptat permite stabilirea comportării la vaporizare a picăturilor de AdBlue injectate în volumul gazelor de ardere fierbinți ale motorului diesel, în jurul temperaturii de saturație, fenomen care interesează la studierea depunerilor sărurilor de AdBlue pe fagurele catalizatorului. Cu cât viteza picăturilor de AdBlue este mai ridicată cu atât temperatura picăturilor de AdBlue crește mai rapid.

### 3.3 Contribuții privind determinarea diametrului picăturilor de AdBlue injectate în volumul gazelor de evacuare ale SCR, cu și fără considerarea fenomenul difuziv

Este necesar să fie luat în considerare faptul că în unele situații predomină procesele difuzive. După cum s-a arătat, în cazul injecției de AdBlue în sistemele SCR, procesele au loc în volum, [MI96], situație caracteristică jeturilor care nu ating suprafețele pereților tubulaturii. Procesul de vaporizare decurge izobar-izotermic, putând fi influențat de difuzia moleculară. Întrucât pe timpul vaporizării concentrația de vapori de la suprafața picăturii lichide este diferită de concentrația la o rază mai mare decât raza picăturii, apare un gradient de concentrație notat cu  $dC/dr$ . Luând în considerare difuzia moleculară, se presupune că are loc un transfer de masă, conform legii lui Fick:

$$J_{az} = -D_{AB} \frac{dC}{dr}, \quad (3.13)$$

unde:  $J_{az}$  [ $mol/m^2s$ ] - reprezintă fluxul molar difuziv, care este o măsură a variației masei molare transportate în unitatea de timp prin unitatea de suprafață, normală la direcția de deplasare,  $D_{AB}$  [ $m^2/s$ ] - coeficientul de difuzie termică al substanței A prin substanța B, iar  $dC/dr$  - gradientul concentrației, unde  $C$  [ $mol \cdot m^{-3}$ ] - concentrația,  $r$  [m] - raza picăturii de AdBlue.

Pentru a calcula coeficientul de difuzie termică, notat  $D_{AB}$ , se vor lua în considerare amestecul de gaze de ardere și vaporii de AdBlue. Se știe că vaporii au o conduită apropiată de



cea a gazelor ideale, singura diferență în cazul de față fiind faptul că picăturile lichide au o pondere volumică neînsemnată. Pe lângă aceste proprietăți termofizice, coeficientul de difuzie binar poate influența viteza de vaporizare, în special în cazul picăturilor statice. Teoria care descrie difuzia amestecurilor gazoase binare la presiunea atmosferică, [KN18], a fost dezvoltată pe baza soluției ecuației lui Boltzmann. Astfel, ecuația difuziei termice, conform [LS20], are forma:

$$D_{AB} = \frac{1,858 \cdot 10^{-3} T_g^{\frac{3}{2}} \left( \frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{\frac{1}{2}}}{P_g \sigma_{AB}^2 \Omega}, \quad (3.14)$$

unde:  $T_g [K]$  - temperatura mediului gazos în care are loc fenomenul difuziv,  $M_A, M_B [g/mol]$  - masele moleculare ale gazelor de ardere și ale picăturilor de AdBlue ( $M_A = 30,4 g/mol$ ;  $M_B = 60,05 g/mol$ ),  $P_g [Pa]$  - presiunea gazelor de ardere,  $\Omega$  - integrala de ciocnire - adimensională,  $\sigma_{AB} [m]$  - diametrul de ciocnire.

Pentru efectuarea calculului, s-au utilizat o serie de parametri care se regăsesc în codul de calcul, realizat în Mathcad, prezentat în ANEXA 2.

După cum s-a menționat, motoarele diesel folosesc o soluție de AdBlue formată din apă și uree. Pentru a studia cum se comportă cele două fluide din soluția injectată în gazele fierbinți de evacuare, s-a trasat în figura 3.4 variația coeficientului de difuzie în cazul soluției de AdBlue, față de cazul apei.

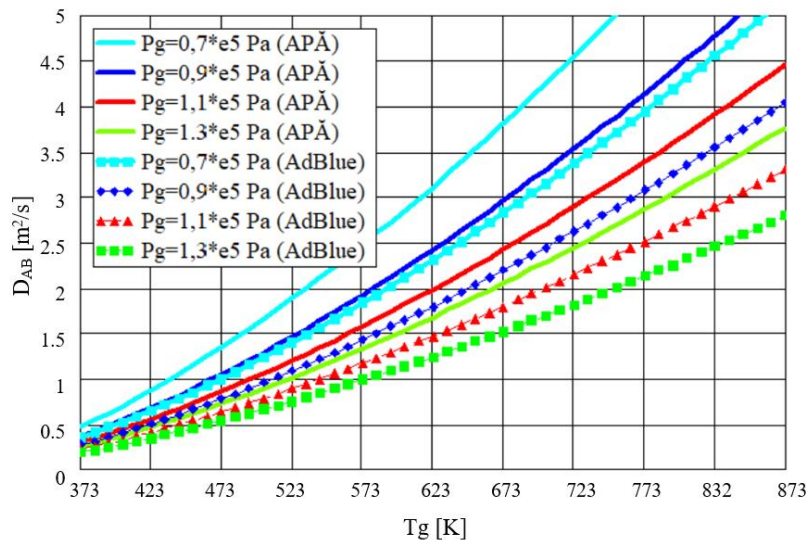


Fig. 3.4. Coeficientul de difuzie termică pentru apă și AdBlue în funcție de temperatura mediului gazos, luând în considerare presiunea din tubulatura de evacuare.

Modificările apărute între cele două lichide pot fi puse pe seama maselor molare diferite, întrucât datorită valorilor mai mari la picăturile de AdBlue, difuzibilitatea scade o dată cu creșterea presiunii gazelor de evacuare.

Utilizând modelul dezvoltat de Mihai I., [MI96], se poate calcula debitul masic de AdBlue injectat în volumul din amonte catalizator, luând în considerare procesul de difuzie termică:

$$\dot{m}_v = \frac{dm_v}{d\tau} = \frac{d(v_A M_A)}{d\tau} = -A_p M_A D_{AB} \frac{dC}{dr} = -A_p \frac{M_A D_{AB}}{RT} \frac{dp_{pv}}{dr}, \quad (3.18)$$

unde:  $\dot{m}_v$  [kg/s] - debitul masic de AdBlue injectat în volum,  $A_p$  [m<sup>2</sup>] - aria picăturii de AdBlue,  $\tau$  [s] - timpul,  $v_A$  [mol] - cantitatea molară de AdBlue,  $C$  [mol·m<sup>-3</sup>] - concentrația,  $r$  [m] - raza picăturii,  $p_{pv}$  [Pa] - presiunea parțială a vaporilor.

Se obține ecuația care permite determinarea diminuării diametrului picăturilor de AdBlue injectate într-un mediu gazos fierbinte, luând în considerare difuzia termică:

$$d_{PAD} = \sqrt{d_{mAB}^2 - 8 \cdot \frac{M_B}{RT_g \rho_{AD}} \cdot D_{AB} \Delta p \left[ 1 + 0,276 \left( \frac{u d_{mAD} \rho_{AD}}{\mu_{AD}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\left( \frac{\mu_{AD}}{\rho_{AD} \cdot D_{AB}} \right)^{\frac{1}{3}}} \right] \tau}, \quad (3.25)$$

Semnificația mărimilor din relația dedusă este:  $d_{PAD}$  [m] - diametrul picăturii de lichid supusă procesului de vaporizare,  $R=8314,472$  [J/molK] - constanta universală a gazelor,  $T_g$  [K] - temperatura mediului gazos în care sunt pulverizate picăturile de AdBlue,  $D_{AB}$  [m<sup>2</sup>/s] - coeficientul de difuzie termică,  $u$  [m/s] - viteza picăturii de AdBlue,  $\rho_{AD}$  [kg/m<sup>3</sup>] - densitatea lichidului injectat (AdBlue),  $\mu_{AD}$  [Pa·s] - vâscozitatea dinamică a soluției de AdBlue.

Conform studiilor efectuate, [FS04], [BA11] s-a constatat că există o legătură directă între termenii legați de vaporizarea moleculelor de substanță și transferul de căldură convectiv. Utilizând relațiile deduse s-a obținut un cod de calcul în Mathcad, care permite determinarea variației în timp a diametrului picăturilor de AdBlue injectate într-un mediu gazos fierbinte. Relația obținută poate considera sau nu existența fenomenului difuziv, caz în care în figura 3.5 a-b se prezintă variația în timp a diametrului picăturilor de AdBlue, funcție de temperatura gazelor de evacuare.

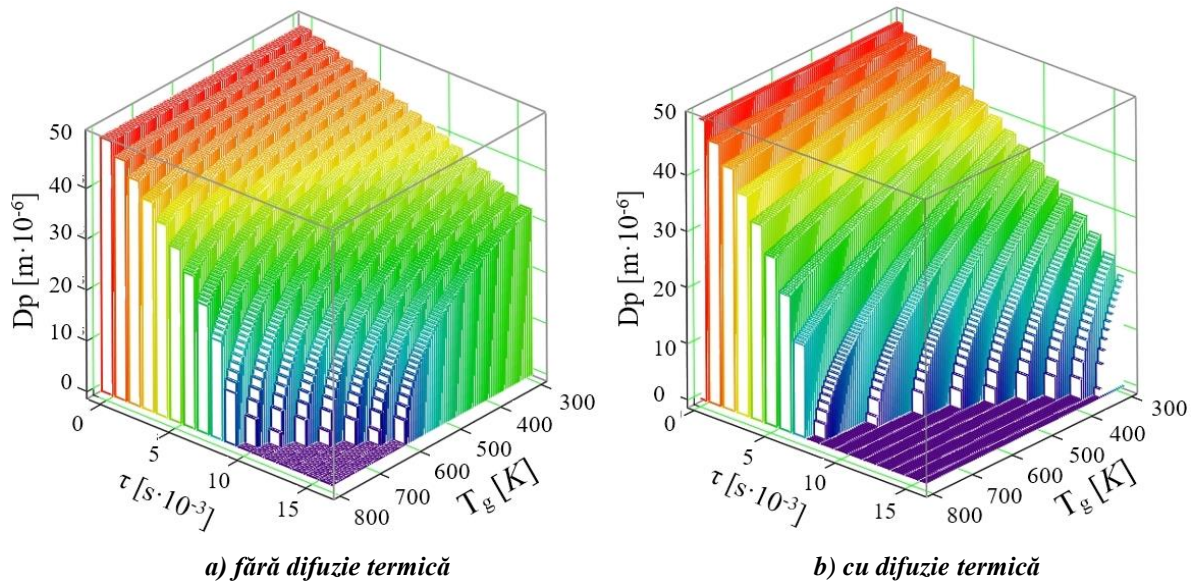


Fig. 3.5a-b. Variația diametrului picăturilor de AdBlue în timp cu temperatura gazelor de evacuare la o viteză  $u=10$ m/s: a) fără difuzie termică și b) cu difuzie termică.

În calcule s-a adoptat temperatura inițială a picăturilor injectate,  $T_{AD}=293$ K și densitatea vaporilor de AdBlue în fluxul de gaz  $\rho_{AD}=1087$ kg/m<sup>3</sup>. Știind că temperatura minimă pentru buna funcționare a unui SCR este de 453,15K, calculele au luat în considerare temperatura mediului gazos ca fiind  $T_g=300\div 800$ K. Rezultatele calculelor sunt ilustrate în figura 3.5, unde, în primul caz, este considerată vaporizarea picăturii de AdBlue fără a lua în considerare

fenomenul de difuzie termică, iar în cel de-al caz cu introducerea coeficientului de difuzie  $D_{AB}$  a cărei valoare se modifică în funcție de fluidul de lucru și de temperatură. Se întâlnesc cazurile:

1. Dacă nu este luat în considerare fenomenul difuziei termice, a rezultat din calcule că o picătură de AdBlue cu diametrul  $d_{PAD}=50 \cdot 10^{-6} m$  aflată la o viteză  $u=10m/s$  se poate vaporiza complet în timpul  $\tau=9 \cdot 10^{-3}s$  la temperatura gazelor de ardere maximă necesară vaporizării  $T_g=800K$ , în timp ce la  $T_g=600K$  timpul necesar vaporizării complete este  $\tau=16 \cdot 10^{-3}s$ . Deci, vaporizarea completă a picăturilor de AdBlue decurge cu atât mai repede cu cât temperaturile gazelor de evacuare sunt mai mari.

2. Dacă este luat în considerare fenomenul de difuzie termică, la un același diametru inițial al picăturii  $d_{PAD}=50 \cdot 10^{-6} m$  și o aceeași viteză a gazelor de evacuare  $u=10m/s$ , se constată că picăturile de AdBlue se vaporizează mult mai rapid decât în cazul precedent (fără considerarea difuziei termice). Astfel vaporizarea decurge complet într-un timp  $\tau=7 \cdot 10^{-3}s$  la o temperatură a gazelor de ardere maximă necesară  $T_g=767K$ , în timp ce la temperatura  $T_g=367K$  timpul minim necesar este  $\tau=16 \cdot 10^{-3}s$ .

Se știe că temperatura minimă pentru buna funcționare a SCR este de  $453,15K$ , caz în care se observă că modelul difuziv oferă date mai apropiate de această valoare. Se constată însă ca la viteza luată în considerare  $u=10m/s$  nu se obțin încă valori care să ateste că vaporizarea totală a picăturilor de AdBlue are loc în timp util. Se poate concluziona că includerea coeficientului difuziv este determinantă pentru vaporizarea picăturilor.

Considerând un același diametru al picăturilor de AdBlue  $d_{PAD}=50 \cdot 10^{-6} m$  și o valoare a vitezei  $u=30m/s$  se constată din figura 3.6 că apare o scădere pronunțată a timpului necesar procesului de vaporizare.

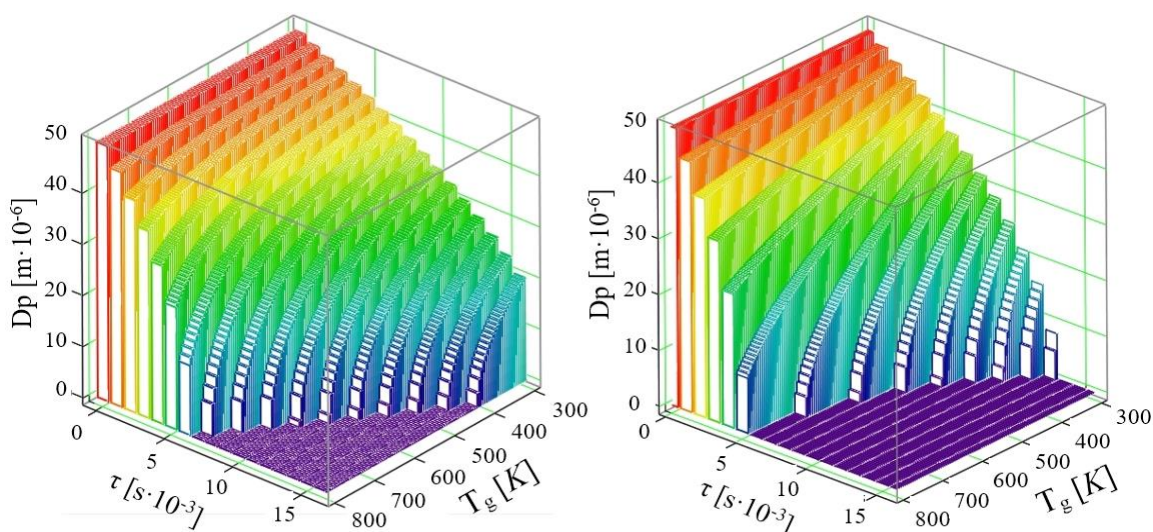


Fig. 3.6a-b. Variația diametrului picăturilor de AdBlue în timp cu temperatura gazelor de evacuare la o viteză  $u=30m/s$ : a) fără difuzie termică și b) cu difuzie termică.

Se întâlnesc cazurile:

1. Dacă nu este luat în considerare fenomenul difuziei termice, la viteza  $u=30m/s$ , se poate observa cu ușurință că o picătură de AdBlue se vaporizează complet la temperatura maximă  $T_g=800K$  în timpul  $\tau=6 \cdot 10^{-3}s$ , în timp ce pentru timpul  $\tau=16 \cdot 10^{-3}s$  este necesară temperatura  $T_g=400K$ .

2. Dacă este luat în considerare fenomenul de difuzie termică, la viteza  $u=30m/s$ , vaporizarea decurge complet într-un timp  $\tau=5 \cdot 10^{-3}s$  la o temperatură maximă a gazelor de ardere  $T_g=800K$ , în timp ce la temperatura  $T_g=366K$  timpul minim necesar vaporizării scade la  $\tau=11 \cdot 10^{-3}s$ . La acest model pentru viteza mediului gazos  $u=30m/s$  se constată că deja toate picăturile se vaporizează integral caz ce corespunde unei bune funcționări a SCR.



În figura 3.7 sunt datele rezultate pentru viteza maximă a picăturilor de AdBlue,  $u=50\text{m/s}$ .

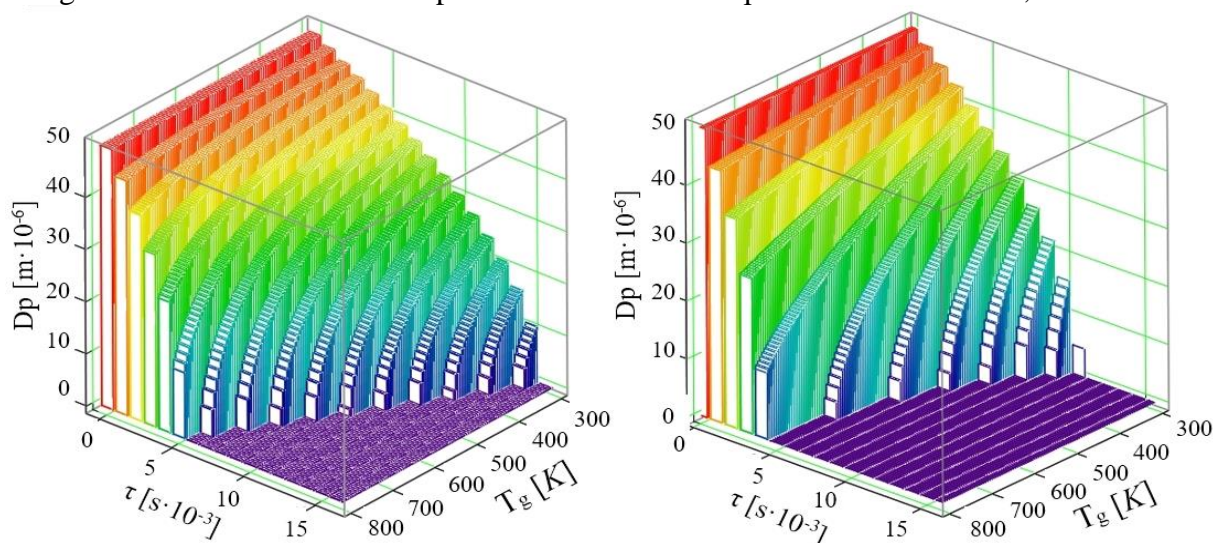


Fig. 3.7a-b. Variația diametrului picăturilor de AdBlue în timp cu temperatura gazelor de evacuare la o viteză  $u=50\text{m/s}$ : a) fără difuzie termică și b) cu difuzie termică.

Ca și în cazurile precedente analizăm situațiile:

1. Dacă nu este luat în considerare fenomenul difuziei termice, se poate observa că picăturile de AdBlue se vaporizează complet la temperatura maximă  $T_g=800\text{K}$ , în timpul  $\tau=5\cdot 10^{-3}\text{s}$  iar la o temperatură  $T_g=330\text{K}$  în  $\tau=14\cdot 10^{-3}\text{s}$ .

2. Dacă este luat în considerare fenomenul de difuzie termică, la viteza  $u=50\text{m/s}$ , vaporizarea decurge complet într-un timp  $\tau=4\cdot 10^{-3}\text{s}$  la o temperatură maximă a gazelor de ardere  $T_g=530\text{K}$ , în timp ce la temperatura  $T_g=333\text{K}$  timpul necesar vaporizării complete este  $\tau=9\cdot 10^{-3}\text{s}$ .

Rezultatele analitice obținute cu ajutorul algoritmului de calcul arată că modelul matematic utilizat permite determinarea analitică a diametrului picăturii pe timpul vaporizării, în funcție de viteza picăturilor de AdBlue și temperatura mediului în care acestea evoluează.

Bazându-ne pe rezultatele obținute, se pot formula următoarele concluzii:

- durata vaporizării picăturilor de AdBlue în interiorul sistemelor SCR influențează calitatea de conversie a  $\text{NO}_x$  în catalizatoarele acestora;
- durata de trecere a picăturii din starea lichidă în cea de vapori este esențială pentru îmbunătățirea sistemelor SCR la funcționarea motorului diesel la rece;
- calculele analitice cu și fără considerarea difuziei termice arată diferențe cantitative semnificative pentru durata de vaporizare a picăturilor de AdBlue care evoluează într-un mediu gazos fierbinte;
- modelul care ia în considerare fenomenul de difuzie termică asigură rezultate mai apropiate de realitate, întrucât curbele de variație arată diminuarea diametrelor picăturilor, odată cu creșterea temperaturii mediului gazos și a vitezei de deplasare.

Aprecierea rezultatelor modelului adoptat care ia în considerare difuzia termică, are la bază rezultate similare din literatura de specialitate.

### 3.4 Contribuții privind schimbul de căldură la injecția AdBlue pe suprafețe în regim pelicular

Dacă experimental se pulverizează picături foarte fine de AdBlue provenite de la un injector peste o suprafață puternic încălzită (peste temperatura de saturație), se constată că apare un proces violent de vaporizare. Suprafața de schimb de căldură este acoperită inițial de o peliculă de AdBlue (în stare lichidă) urmată rapid de formarea unui strat de vapori, caz în care schimbul

de căldură este mai puțin intens decât în cazul fierberii nucleice. În figura 3.8 este dat un model al fenomenelor care apar la vaporizarea unei picături de AdBlue pe o suprafață fierbinte.

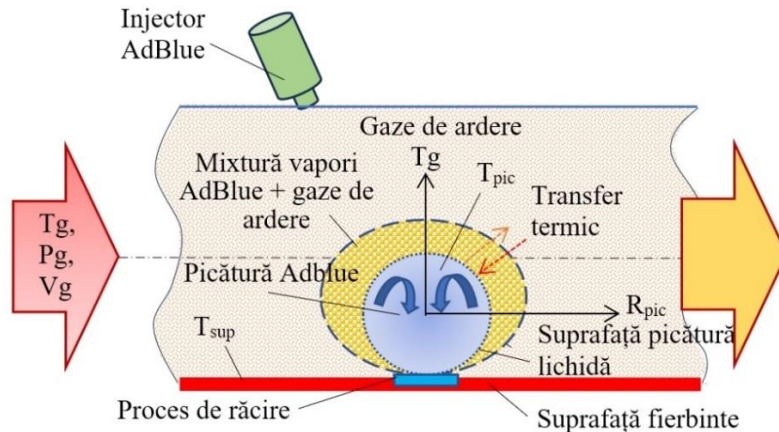


Fig. 3.8. Procesele termofizice ale unei picături de AdBlue care se vaporizează pe o suprafață fierbinte.

În practică, temperatura peretelui poate depăși valorile de saturație ale peliculei de lichid care se vaporizează. Intensitatea schimbului de căldură este dictată de rezistența termică a peliculei de vapori. Având în vedere că suprafața peretelui are temperaturi mult mai ridicate decât valoarea temperaturii inițiale a picăturilor de AdBlue, poate să apară în timp o supraîncălzire a vaporilor, iar schimbul de căldură trebuie să țină cont și de radiație. În prima fază a contactului picăturilor de AdBlue cu volumul gazelor fierbinți, are loc un proces de vaporizare cu intensitate scăzută pus pe seama timpului redus de contact. Marea majoritate a picăturilor ajung pe suprafețele opuse injectorului de AdBlue. Picăturile odată ajunse în contact cu suprafața, trec brusc de la o valoare inițială scăzută a temperaturii către valori mult mai ridicate, într-un timp extrem de scurt. Acest lucru conduce la formarea vaporilor de AdBlue care se desprind într-o primă etapă din pelicula de lichid. Vaporii formați se amestecă cu gazele fierbinți, situație ce conduce la intensificarea fenomenului prin turbulență și transfer termic. Injectarea soluției de AdBlue pe suprafețe conduce pentru o perioadă scurtă de timp la diminuarea temperaturii locale a peretelui tubulaturii de evacuare, fenomen ce poate conduce la reducerea parțială a descompunerii ureei.

*La sistemele SCR, pentru a se evita scăderea temperaturii din interiorul canalizației de evacuare și pentru creșterea eficacității acestora la funcționarea la rece a motorului diesel, se utilizează metoda preîncălzirii gazelor de evacuare în amonte de fagurele catalizatorului.*

În cazul în care se utilizează sistemul cu preîncălzire are loc un proces de vaporizare controlat, mult mai eficace decât în cazul clasic.

Pentru transferul de căldură pe suprafețe se poate calcula transferul de masă care are loc prin raportare la picăturile de AdBlue, determinându-se viteza de vaporizare, și variația diametrului picăturii în timp. Se consideră prin ipoteză că procesul de vaporizare apare atunci când între picătură și suprafața cu care vine în contact are loc un transfer de căldură și că temperatura picăturii este mult mai mică decât temperatura mediului de contact. Pentru calculul variației diametrului picăturilor de AdBlue în timp, cu temperaturi ale suprafeței

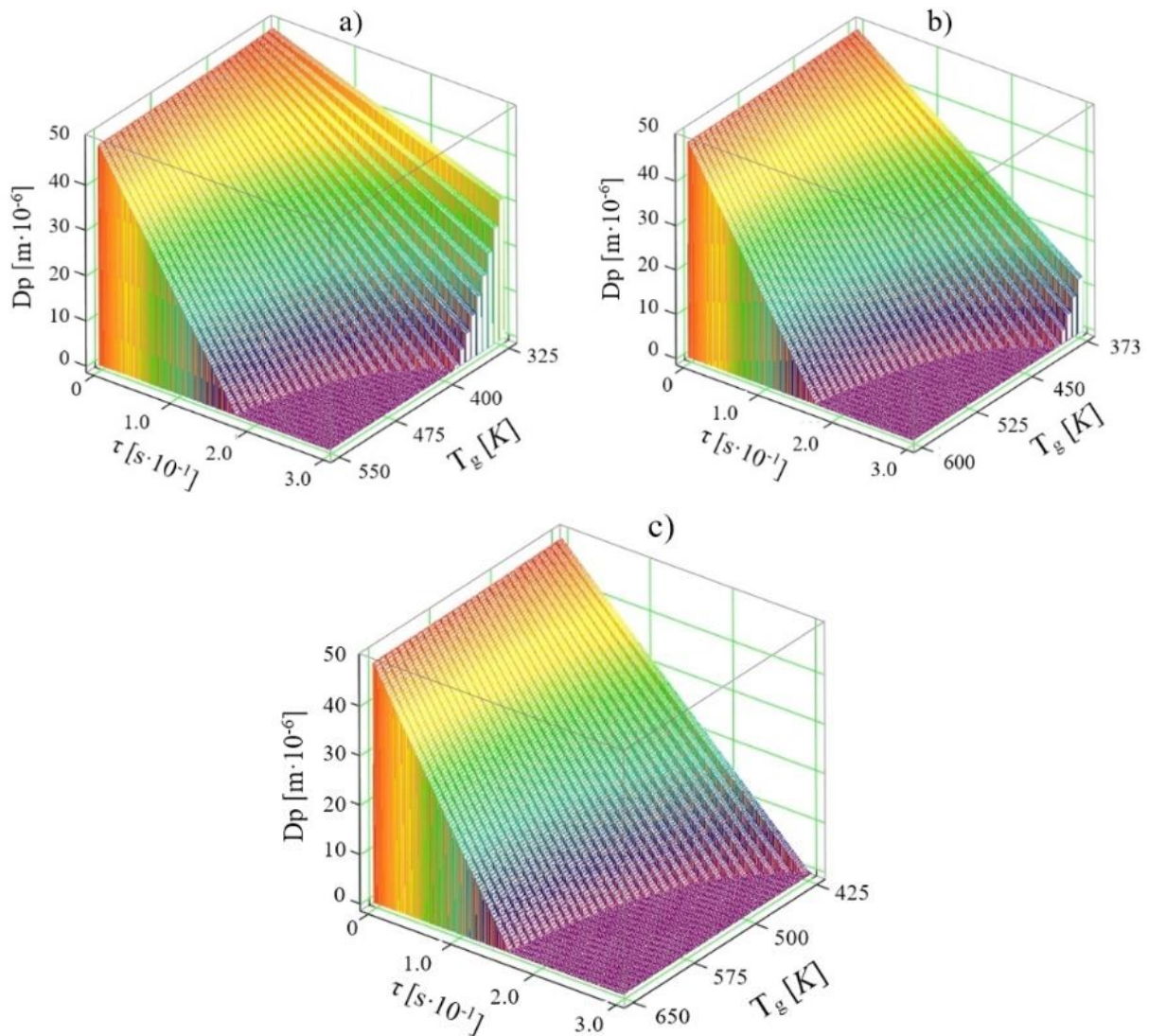
$$d_{PAD} = d_{Pi} - \left[ \frac{8\lambda_v}{C_{pv}\rho_{AD}} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{C_{pv}}{l_v} (T_S - T_{PAD}) \right] \right] \cdot \tau, \quad (3.29)$$

unde:  $\lambda_v$  [W/mK] - coeficientul de conducție termică a vaporilor de AdBlue,  $d_{PAD}$  [m] - diametrul picăturii de AdBlue pe timpul vaporizării,  $d_{Pi}$  [m] - diametrul inițial al picăturii de AdBlue,  $C_{pv}$  [J/kgK] - căldura specifică la presiune constantă a vaporilor,  $l_v$  [J/kg] - căldura

latentă de vaporizare,  $T_s$  [K] - temperatura suprafeței de contact,  $T_{PAD}$  - temperatura picăturii de AdBlue.

În calcule, picăturile injectate se consideră a avea diametrul inițial  $d_{PAD}=50 \cdot 10^{-6}m$  înainte ca acestea să vină în contact cu suprafața de contact. După cum s-a arătat, viteza de vaporizare a picăturilor de AdBlue influențează formarea vaporilor care la rândul lor asigură la SCR eficacitatea conversiei gazelor de ardere în NOx.

Cu ajutorul algoritmului de calcul, care are la bază relația 3.29, se poate calcula cum se modifică diametrul picăturilor de AdBlue în timp, atunci când vin în contact cu o suprafață fierbinte, în funcție de temperatura acesteia, graficele obținute fiind prezentate în figura 3.9.



**Fig. 3.9a-c. Variația diametrului picăturilor de AdBlue în timp, cu temperaturi ale suprafeței: a) 325-550K, b) 373-600K, c) 425-650K.**

Analizând rezultatele obținute, se remarcă faptul că temperatura inițială a suprafeței pe care se injectează picăturile de AdBlue este importantă întrucât o dată cu mărirea acesteia (pe măsură ce regimul termic al motorului crește) scade timpul de vaporizare. Astfel, dacă în primul și al doilea caz picăturile nu se vaporizează total, se constată că după ce temperatura suprafeței atinge 425K procesul de vaporizare este complet în doar 0,3s. Putem concluziona că, dacă crește temperatura suprafeței de contact procesul de vaporizare a picăturilor de AdBlue este tot mai accentuat, simultan cu atingerea sau chiar depășirea temperaturii de saturație.



### 3.5 Intensificarea transferului de căldură și de masă prin utilizarea undelor ultrasonore în cadrul procesului de calefacție

Eficiența catalizatorului SCR depinde în mare măsură de temperatura de lucru, materialele din care sunt confecționate și îndeosebi de procesul de vaporizare completă a vaporilor de AdBlue. Conform lui Chiriac F. ș.a., [CF82], utilizarea ultrasunetelor conduce la intensificarea proceselor de transfer de masă (extracție, dizolvare, sublimare) sau la transfer simultan de căldură și de masă (evaporare, vaporizare, rectificare, uscare). Conform aceluiași autor, [CF82], intensificarea atomizării prin utilizarea undelor ultrasonore conduce la creșterea coeficientului de transfer de căldură cu 30÷450%. Transferul de masă se realizează atât prin creșterea turbulenței în stratul limită și în volumul fluidului, cât și prin creșterea suprafeței de contact între faze.

#### 3.5.1 Calculul variației temperaturii suprafeței discului magnetostrictiv la impactului cu picăturile de AdBlue, cu și fără ultrasunete

În experimente se utilizează ultrasunete generate cu un concentrator magnetostrictiv prevăzut în partea superioară cu un disc, generatorul transformând pelicula de lichid într-un nor de picături, care vor fi trimise prin convecție forțată în calea gazelor de ardere fierbinți, întrunindu-se astfel condițiile de apariție a fenomenului de calefacție.

Se consideră un mediu bifazic asupra căreia turbulențele create de vibrațiile generate de undele ultrasonice în stratul limită și în volum conduc la o micșorare a rezistenței termice, amplificând astfel, rata transferului de căldură. Relația folosită în cazul unui film de fluid care vibrează pe un disc, [CF82], este dată de criteriul de similitudine Sherwood, notat Sh:

$$Sh = 0,746Re^{0,5}Sc^{0,33} \left( \frac{A}{r_{cv}} \right)^{1/6}, \quad (3.31)$$

unde:  $Re$  – numărul Reynolds iar,  $Re=2\omega Ar_{cv}/v_f$ ,  $\omega$  [rad/s] - pulsația,  $A$ [m], - amplitudinea,  $r_{cv}$ [m] - raza cilindrului vibrant,  $v_f$  [Hz] - frecvența,  $Sc$  - criteriul Schmidt ( $Sc = \mu/\rho D$ ),  $\mu$ [Pa·s] - vâscozitatea dinamică,  $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>] - densitatea,  $D$ [m<sup>2</sup>/s] - coeficientul de difuzie.

Se consideră două cazuri în care picăturile de AdBlue întâlnesc suprafața solidă. Prima situație fiind în condițiile absenței ultrasunetelor, iar cea de-a doua în prezența acestora. După ce discul ajunge la temperatura maximă, acesta fiind spălat de gazele fierbinți, se injectează picături de AdBlue formându-se o peliculă subțire de lichid. Din momentul injectiei până la atingerea suprafeței, picătura schimbă căldură convectiv, însă, întrucât drumul străbătut este scurt (de ordinul centimetrilor), temperatura acesteia va crește foarte puțin. În momentul în care picăturile ating suprafața discului, are loc un transfer termic. În cazul apariției unui impuls spontan de energie la suprafața discului,  $E=\lim (q_s t)$  [kJ/m<sup>2</sup>], pe măsură ce timpul crește diferența de temperatură poate fi descrisă prin ecuația:

$$T_m - T_0 = \frac{E}{\rho C_p \sqrt{\pi a \tau}} \exp\left( \frac{x^2}{4a\tau} \right), \quad (3.32)$$

unde:  $T_m$ [K] - temperatura discului la momentul calculat,  $T_0$ [K] - temperatura inițială a discului,  $E$  [kJ/m<sup>2</sup>] - energia de suprafață,  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] - densitatea,  $C_p$  [J/kgK] - căldura specifică la presiune constantă,  $a$ [m<sup>2</sup>/s] - coeficientul de difuzivitate termică,  $\tau$ [s] - timpul,  $x$ [m] - distanța de propagare a căldurii. Considerând temperatura inițială a discului ca fiind 473K, în momentul în care picăturile jetului ating suprafața fierbinte a discului, apare o răcire a acestuia la 307K. Figura 3.11 reprezintă variația temperaturii suprafeței discului cu raza picăturii, aplatizată la

contactul cu discul magnetostrictiv, în cazul în care aceasta rămâne la suprafață 1÷20ms, fără a se aplica unde ultrasonore.

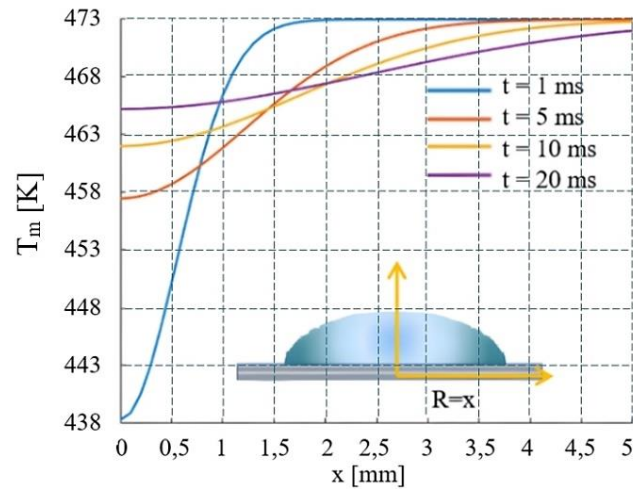


Fig. 3.11. Variația temperaturii suprafeței discului magnetostrictiv la impactului cu o picătură de AdBlue, într-un mediu fără unde ultrasonore.

Din calcule rezultă că după 1ms temperatura discului în centrul picăturii are cea mai scăzută valoare de 438K, fapt ce poate fi explicat pe seama cantității mari de lichid. Odată cu creșterea distanței  $x$  de la centrul picăturii către extremitatea acesteia, temperatura discului crește până la valoarea maximă de 473K. Acest lucru se poate explica pe seama diminuării cantității de lichid încălzit. În centrul picăturii, după 5ms, temperatura atinge 457K, după 10ms prezintă 461K, iar la 20ms atinge 465K. Pe de altă parte, la extremitatea picăturii, ( $x = 3,7mm$ ) temperaturile sunt apropiate de valoarea maximă, fiind cuprinse între 471÷473K.

În codul de calcul s-a luat în considerare cazul în care sunt aplicate unde ultrasonore asupra discului, folosindu-se relația:

$$T_m - T_0 = \frac{E}{\rho C_p \sqrt{\pi a \tau}} \exp\left(\frac{2x(j)^2}{4at \sin(2\pi v_f \tau)}\right), \quad (3.33)$$

Rezultatele obținute în codul Matlab sunt prezentate în figura 3.12.

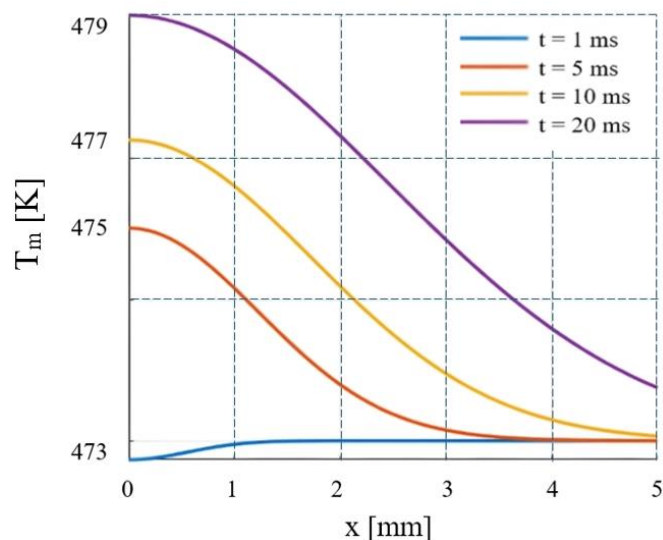


Fig. 3.12. Variația temperaturii suprafeței discului magnetostrictiv, la momentul impactului cu o picătură de AdBlue într-un mediu cu unde ultrasonore.



Se observă din figură faptul că linia albastră, care corespunde primei milisekunde de contact dintre picătura de AdBlue și discul magnetostrictiv, corespunde unui proces pulsatoriu. În comparație cu varianta anterioară, unde contactul picătură-disc se regăsea pe toată suprafața, timpii de contact sunt mult mai scurți. De asemenea, figura evidențiază apariția unui transfer de căldură mult mai pronunțat în centrul picăturii de AdBlue, fenomen ce poate fi pus pe seama prezenței vibrațiilor generate de undele ultrasonore. Spre deosebire de cazul anterior, datorită intensificării transferului de căldură și, îndeosebi, a celui de masă, răcirea discului este mai pronunțată în centrul picăturii. Explicația faptului că transferul de căldură și masă este mai intens la periferia picăturii, poate fi pusă pe seama creșterii pronunțate a agitației moleculare.

### 3.6 Simularea proceselor de căldură și masă la sistemele SCR

Simularea proceselor din motoarele diesel, inclusiv a celor din SCR, se realizează în ultimul timp cu ajutorul unor platforme informatice evolute. Pentru cazul schimbului de căldură și a celui de masă se poate utiliza mediul de programare ANSYS.

#### 3.6.1 Contribuții privind calculul dinamic și simularea vaporizării picăturilor de AdBlue utilizând modelul VOF

Pentru a evalua influența picăturii de apă care intră în contact cu o suprafață plană încălzită se pot realiza simulări în ANSYS Fluent, [PC20], care urmăresc evoluția dinamică a picăturii, considerând sau nu accelerația gravitațională. Forma picăturii de AdBlue aflată în mișcare se modifică în timp și este definitorie în momentul impactului cu suprafața plană. Pentru simularea evoluției în timp a picăturilor de AdBlue care se deplasează sau ciocnesc o suprafață fierbinte a fost utilizată *metoda volumului de fluid*, prescurtată VOF.

În figura 3.19 este prezentă dinamica picăturii de lichid, obținută prin simulare.

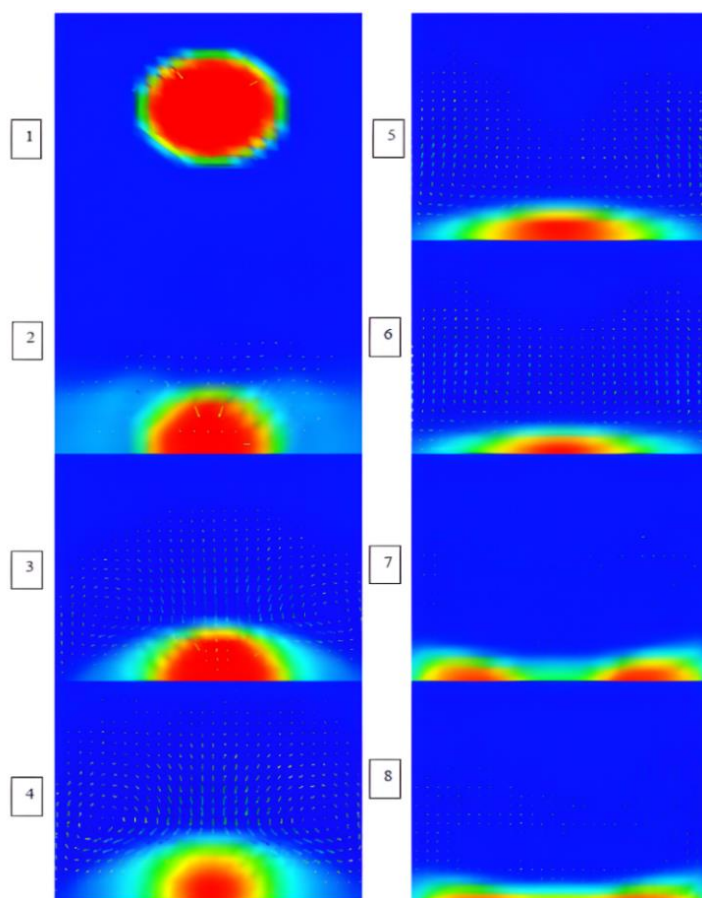


Fig. 3.19. Simularea impactului unei picături de AdBlue cu o suprafață plană.

### 3.6.2 Contribuții privind simularea variației temperaturii în zona de preîncălzire locală a tubulaturii de evacuare

Pentru atingerea temperaturii optime de funcționare a catalizatorului SCR la pornirea și funcționarea la rece a motorului diesel, se practică metoda preîncălzirii locale a gazelor de evacuare în amonte de zona de injecție a soluției de AdBlue. Pentru aceste condiții, a fost efectuată o simulare în mediul de proiectare ANSYS, cu scopul de a se studia cum se comportă sistemul SCR. În figura 3.21 este prezentată configurația sistemului SCR cu preîncălzire, care constă dintr-un sistem de ejecție a vaporilor de AdBlue notat cu 2, la care a fost atașat un sistem inductiv de preîncălzire, notat cu 1.

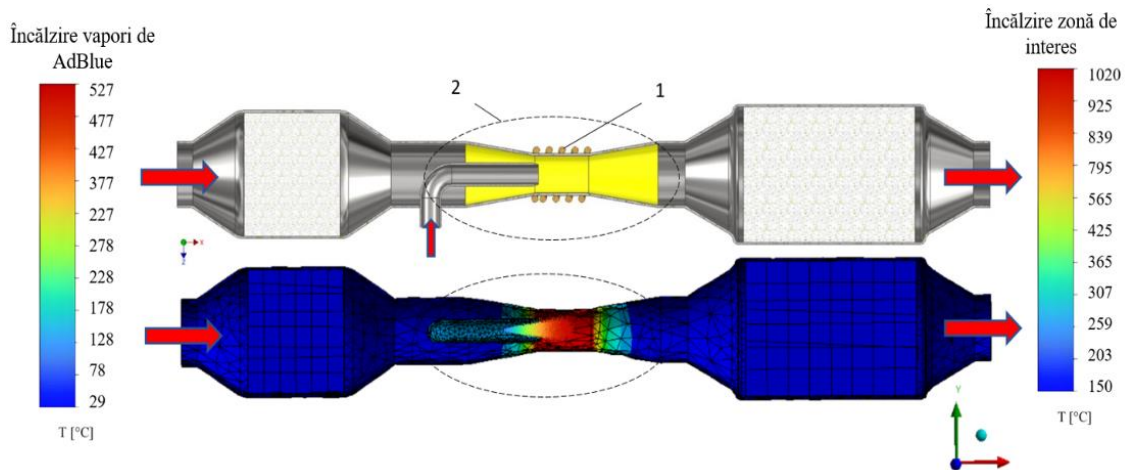


Fig. 3.31. Simulare ANSYS a modului de preîncălzire la un SCR.

Configurația luată în considerare consideră un proces scurt de preîncălzire la o temperatură de 1293K. Prin simulare se urmărește efectul preîncălzirii asupra evoluției temperaturii jetului de AdBlue atomizat, în contact cu gazele de evacuare considerate a fi reci, care curg la o presiune constantă de peste  $1 \cdot 10^5 Pa$ . Rezultatele obținute evidențiază o creștere locală a temperaturii datorată fenomenului inductiv de preîncălzire, fenomen care are impact asupra micropicăturilor de AdBlue. Totodată, apare o disipare a căldurii în zona ejectorului. Vizualizarea temperaturii este esențială pentru înțelegerea conduitei substanței în amonte de sistemul SCR, în condiții de funcționare la temperaturi ridicate obținute prin preîncălzirea amestecului în care gazele de evacuare sunt relativ reci. Prin simulare se poate aprecia modul în care preîncălzirea inductivă și atomizarea influențează performanța generală a generării vaporilor la sistemele SCR, când motorul diesel este rece.

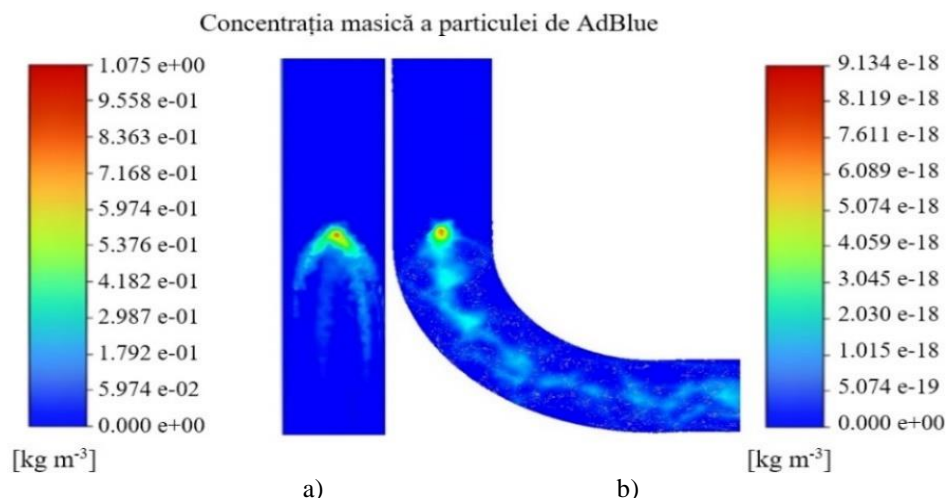
### 3.6.3 Contribuții privind simularea schimbului termic convectiv la injecția AdBlue într-un mediu gazos fierbinte

Pentru studiul convectiv al schimbului de căldură prin simulare în ANSYS, s-a realizat modelarea unor picături de AdBlue, considerate sferice, care este injectată printr-o duză conică, într-un mediu gazos, considerat mediu continuu prin ipoteză. Se urmărește ca prin simulare să se determine stările distincte prin care trec picăturile și anume, fazele de vaporizare, evoluția presiunii, fracțiunea de masă a substanței și traiectoria particulelor de lichid.

În continuare, sunt prezentate câteva aprecieri privind realizarea simulării procesului de vaporizare a picăturilor de AdBlue într-un mediu gazos fierbinte, pentru două traiectorii ipotetice. Simularea se poate realiza utilizând mediul de simulare ANSYS Fluent prin implementarea modelului *k-epsilon* cu două ecuații, în mediul de interacțiune continuă.

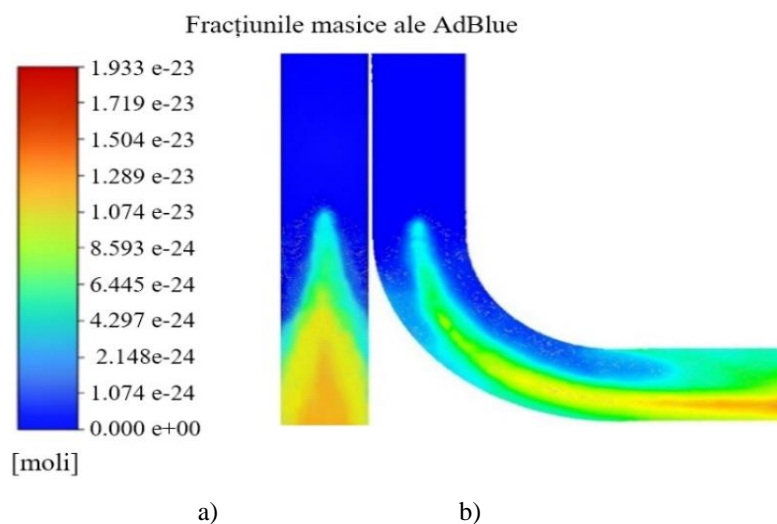
Se consideră că se injectează o picătură de AdBlue cu temperatura de 293K, cu un debit de  $75 \cdot 10^{-4} kg/s$ , într-un mediu gazos aflat la temperatura de 700K.

În figura 3.24-a este analizată evoluția concentrației masice a particulelor de AdBlue în mediul gazos și dispersia particulelor realizată prin injecție în fluxul de gaze, pentru prima configurație (canalizație dreaptă) iar în figura 3.24-b pentru configurația orientată la 90°.



*Fig. 3.24a-b. Dispersia concentrației masice a particulelor în cazul: a) canalizație dreaptă b) cot la 90°.*

Simulările efectuate relevă apariția unor turbulențe în cazul cotului la 90°, când particulele de lichid tind să evolueze haotic, având în vedere și fenomenele difuzive care apar. În figura 3.25 este reprezentată evoluția fracțiunilor masice pentru jetul de picături de AdBlue în fluxul de gaz fierbinte.



*Fig. 3.25a-b. Fraecțiunile masice: a) canalizație dreaptă, b) cot la 90°.*

În figură se pot observa distribuțiile fracțiunilor de volum a celor două configurații pentru jetul de substanță în timpul vaporizării, la contactul cu mediul gazos fierbinte.

### 3.6.4 Analiza procesului de schimbare a masei vaporilor de AdBlue în cazul pseudo-desublimării

Simulările realizate în software-ul ANSYS pentru analiza schimbului de masă și studiul fracțiunilor de volum a lichidului care vine în contact cu gazele de evacuare, au luat în considerare o temperatură inițială de 298K pentru soluția AdBlue lichidă, respectiv 773K pentru gazele de ardere. Figura 3.27 ilustrează simularea unui proces de injecție a soluției de AdBlue în volumul gazelor de evacuare și pe suprafețe (pereții tubulaturii din amonte de SCR).

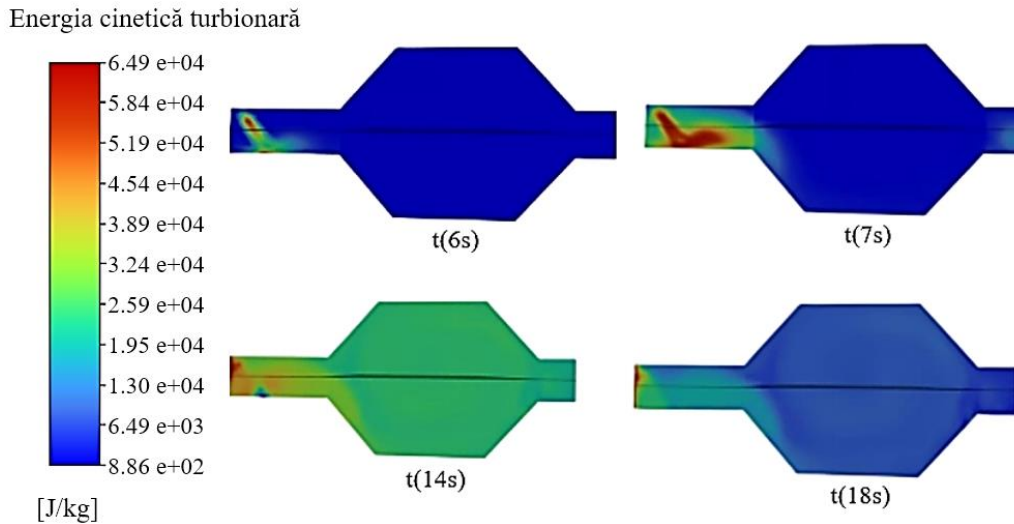


Fig. 3.274. Simularea curgerii în timp a vaporilor de AdBlue la sistemul SCR.

Din figura 3.27 se poate observa că, la momentul  $t(6s)$ , are loc injecția soluției de AdBlue, ceea ce determină o curgere a jetului de picături, formându-se o envelopă care evoluează parțial în volum (prima parte), apoi pe suprafețe (atinge peretele canalizației). La momentul  $t(7s)$  se remarcă o difuzie și o evaporare rapidă a aerosolilor, având loc în fapt chiar procesul de pseudo-desublimare. Acesta constă în transformarea directă a unui lichid în stare solidă, însă, spre deosebire de desublimarea pură, există o fază intermediară (de aici intervine termenul *pseudo*), care constă în apariția de vapori (între starea lichidă și solidă). Deosebit de importantă pentru apariția pseudo-desublimării este temperatura de lucru. Se observă din imagini că o parte a vaporilor de AdBlue sunt integrați și antrenați în gazele de ardere. La momentul  $t(14s)$ , mixtura de vapori AdBlue-gaze de ardere se propagă în întreg volumul catalizatorului SCR. La momentul  $t(18s)$ , există o difuzie pe întreaga lungime a catalizatorului, și, cel mai probabil în anumite condiții, chiar și în interiorul microcanalelor are loc un fenomen de pseudo-desublimare. Această ipoteză va fi verificată prin cercetări experimentale care vor dovedi (sau nu) apariția depunerilor solide ale sărurilor rezultate din AdBlue, în urma procesului de pseudo-desublimare la temperaturi ridicate. În figura 3.28 sunt date rezultatele simulării în ANSYS a comportamentului mixturii din interiorul unui SCR, cu vizualizarea schimbului de masă a vaporilor și a modului de curgere a acestora.

Temperatura

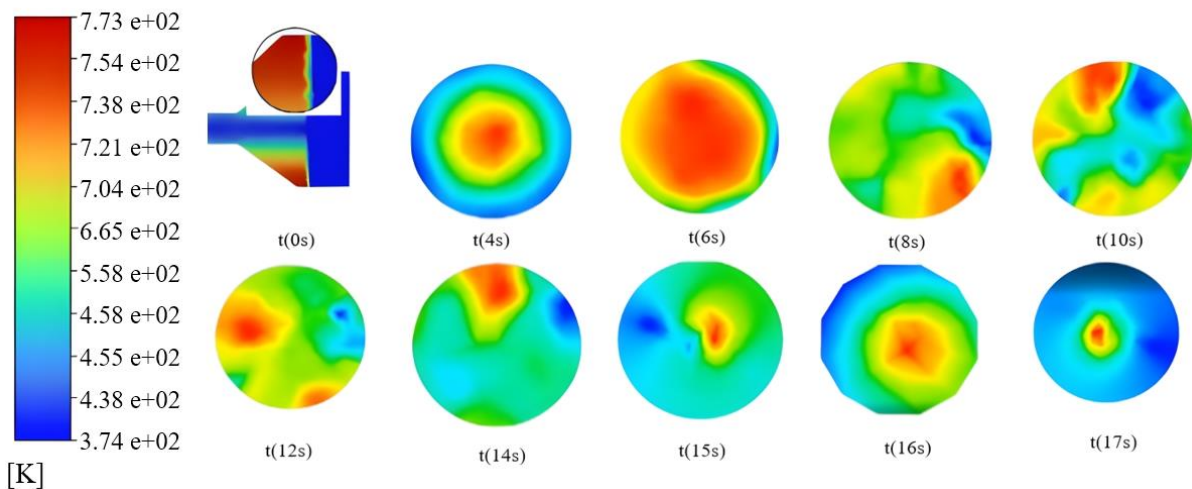


Fig. 3.285. Variația temperaturii de-a lungul unui microcanal SCR, străbătut de mixtura vaporilor AdBlue-gaze de ardere.



Figura 3.28 prezintă variația temperaturii într-un microcanal al unui fagure dintr-un catalizator SCR, cu un diametru echivalent de  $0.8\text{mm}$ . În această reprezentare, se ia în considerare un interval de timp de până la  $t(17s)$ , iar regimul de funcționare este unul tranzitoriu. Injectarea AdBlue începe la  $t(8s)$ , conform ilustrației din figura de mai sus. Prima imagine corespunde momentului  $t(0s)$ , care este asociat perioadei în care gazele fierbinți întâlnesc microcanalele sistemului SCR (cartușul SCR). Se observă că apar oscilații ale presiunii atunci când gazele se ciocnesc de catalizator (indicată prin detaliu). Primele două secțiuni corespund cazului în care în SCR se introduc doar gaze de ardere, remarcându-se că între  $t(4s)$  și  $t(6s)$ , apare o creștere graduală a temperaturii. După acest moment are loc injecția de AdBlue la momentul  $t(8s)$ , moment în care gazele de ardere suferă o răcire. Restul secțiunilor din figură arată modul în care se modifică temperatura în timp, conform gradației din legendă.

În lucrare au fost calculați o serie de parametri specifici timpului de vaporizare a picăturilor de AdBlue. Este normal ca valorile rezultate din calcule să fie comparate cu cele similare în domeniu. Folosind rezultatele obținute din literatura de specialitate s-a pus în evidență, în tabelul 3.2, timpul necesar picăturii să se vaporizeze într-un mediu gazos fierbinte. Calculele au luat în considerare diferite diametre ale picăturii. În tabel se prezintă o sinteză a datelor proprii cu cele din domeniu.

**Tab. 3.2. Compararea duratei de vaporizare a picăturilor aflate într-un mediu gazos fierbinte**

Soluție	Diametrul inițial al picăturii	Timp de vaporizare	Temperatura gazului	Viteza gazului	Mediu vaporizare	Autori
UM	[ $\mu\text{m}$ ]	[s]	[K]	[m/s]		
APA cu uree	750 - 1240	140	323	1,1	Aer cald	[MI21]
APA cu uree	860 - 1300	18	523	2,8		
APA cu uree	570 - 1310	10	673	4,3		
APA cu uree	10	0,003	873	250	Aer cald	[LI20]
APA cu uree	8	0,002				
APA cu uree	900	21	473	0	Aer cald	[WE16]
	892	8	673	0		
	893	7,5	773	0		
APA cu uree	70	0,78	673	0	Aer cald	[BI07]
APA cu uree		0,04	900	100	Aer cald	
AdBlue	50	0,016	600	10	Gaze de ardere	Autor
		0,009	800			
		0,016	367			
		0,007	767			
		0,005	800	30	Gaze de ardere	
		0,011	366			
		0,006	800			
		0,016	400			

Procesul de vaporizare a picăturilor de AdBlue este modelat după diferite modele conform tabelului 3.2. De-a lungul timpului, pentru vaporizarea picăturilor de AdBlue, s-au impus modelele lui Birkhold ș.a. [BF07], Kontin și colab. [KO10]. Aceștia au comparat diametrul picăturilor de AdBlue după diferiți timpi de stagnare într-un mediu gazos fierbinte. Analiza ratei de vaporizare a picăturilor după un model dezvoltat de Lieber, C., [LI20], a arătat că o picătură de AdBlue cu diametrul inițial de  $10\mu\text{m}$  se comportă ca o picătură obișnuită de apă, însă o picătură de AdBlue cu diametrul de  $8\mu\text{m}$  prezintă deja o rată de evaporare considerabil mai mică. Prin studiile efectuate, Lieber, C., [LI20], a demonstrat sensibilitatea procesului de vaporizare funcție de viteza relativă dintre picături și gazul fierbinte.

Deoarece coeficientul de difuzie termică joacă un rol important în calculul transmiterii căldurii, rezultatele obținute, prezentate în figura 3.4, pot fi comparate valoric cu cele obținute

de Nishad ș.a., [NI18]. Calculul analitic dezvoltat de Nishad ș.a. (fig. 3.37), a fost efectuat pentru analiza coeficientului de difuzie a apei și ureei care se vaporizează într-un mediu gazos fierbinte.

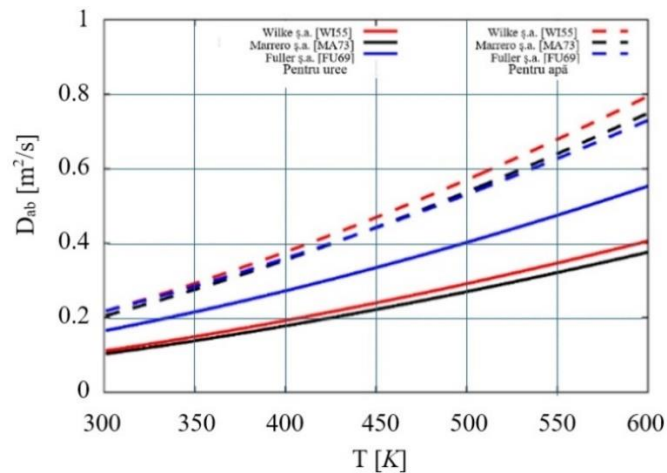


Fig. 3.37. Variația coeficientului de difuzie cu temperatura, [WI55], [MA73], [FU69].

Variația coeficientului de difuzie determinată prin calcule este asemănătoare ca alură și valori cu modelele dezvoltate de Wilke, [WI55], Marrero, [MA73], și Fuller, [FU69], arătând o tendință exponențială de creștere a acestuia cu temperatura. Întârzierea și diferențele de temperatură între modelele dezvoltate în [WI55], [FU69], [MA73], [NI18], sunt datorate compoziției gazelor utilizate în modelare.

Referitor la simulările din ANSYS, Nishad și alții, [NI23], au dezvoltat un model de simulare a formării peliculei de AdBlue și a NH<sub>3</sub> în SCR folosind metoda Euler de transport chimic în regim dinamic. Aceștia au simulat picăturile de AdBlue dispersate printr-un proces de injecție la o presiune moderată, pentru un spray slab atomizat. Din cauza orientării injectorului și a diametrului redus al conductei SCR, spray-ul are o tendință crescută de a se alipi la peretele conductei, cu efectul formării unei pelicule de AdBlue și ulterior a depunerilor solide. Profilurile fracțiunilor termice și de masă (pentru H<sub>2</sub>O și NH<sub>3</sub>), evidențiază impactul semnificativ asupra profilului termic cauzat de evaporarea spray-ului AdBlue.

În figura 3.38 sunt ilustrate comparativ rezultatele obținute de Nishad și cele ale autorului tezei pentru simularea curgerii vaporilor unui jet de AdBlue în sistemul SCR.

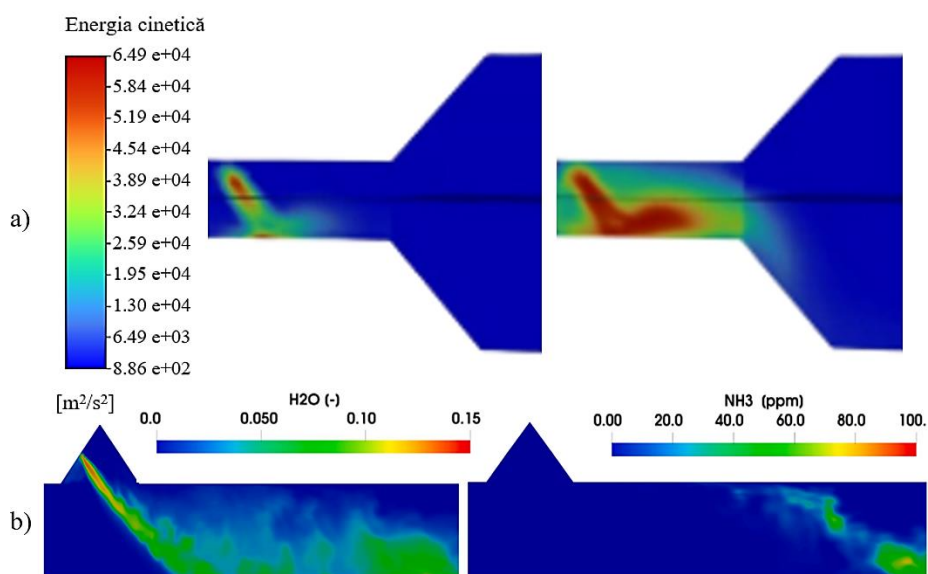
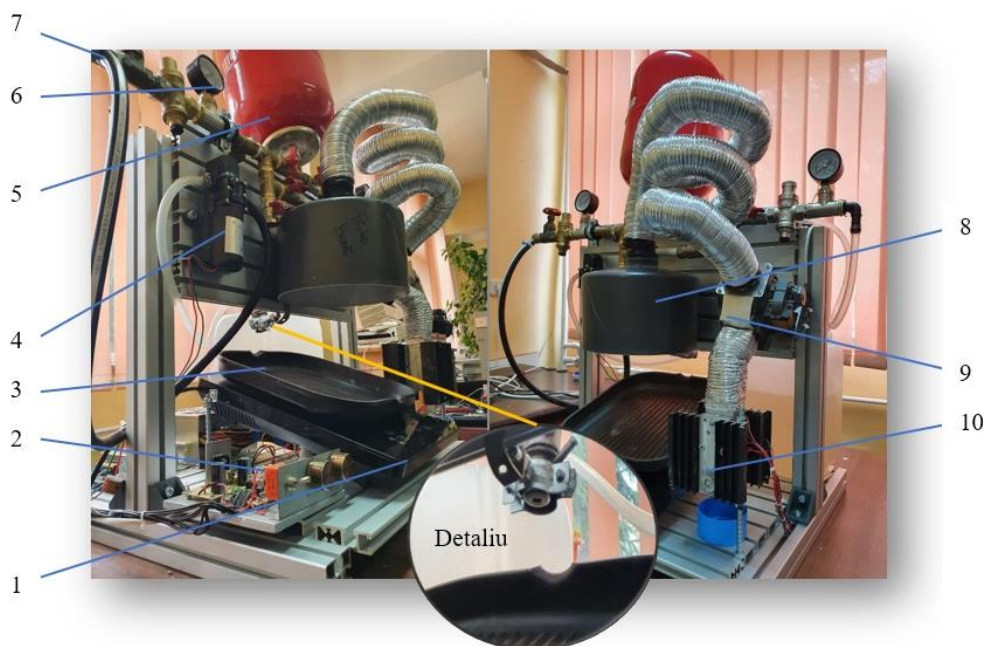


Fig. 3.38a-b. Simularea curgerii vaporilor de AdBlue în sistemul SCR: a) rezultate obținute de autor, b) rezultate după [NI23].

## 4. METODOLOGIA ȘI ECHIPAMENTELE UTILIZATE ÎN CERCETARE

### 4.1 Contribuții aduse la conceperea și realizarea unui stand destinat studiului pseudo-desublimării

Pentru înțelegerea proceselor care au loc la injecția soluției de AdBlue într-un sistem SCR din care rezultă depuneri solide de săruri, a fost conceput un stand experimental care să permită teste de laborator, cu scopul de a se demonstra că, în anumite condiții, poate să apară fenomenul de pseudo-desublimare. În figura 4.1 sunt prezentate elementele componente ale standului experimental pentru studiul fenomenelor care apar la impactul unui jet de AdBlue cu o suprafață fierbinte.



*Fig. 4.1. Stand experimental pentru studiul pseudo-desublimării AdBlue.*

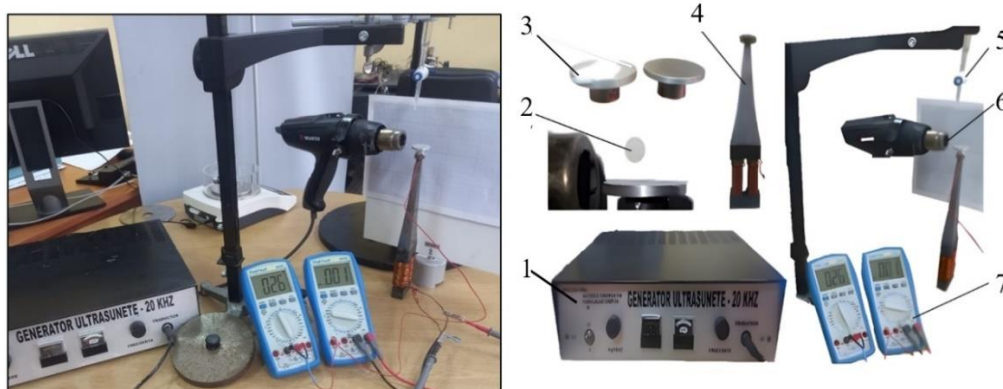
Semnificația notațiilor din figura 4.1 este: 1 - sistem de încălzire inductiv, 2 – unitate electronică de comandă și control, 3 - suprafața de testare, 4 - pompă AdBlue, 5 - rezervor AdBlue, 6 - manometru, 7 - robinet, 8 - hotă, 9 - ventilator, 10 - modul Peltier de răcire a vaporilor.

Soluția de AdBlue este preluată din rezervorul 5, după deschiderea robinetului 7 și transmisă prin intermediul pompei 4 către un injecteur (în detaliu). Injecteurul de AdBlue este controlat de unitatea electronică de comandă și control 2, care poate regla timpul între două injecții și cantitatea de soluție injectată. Manometrul 6 măsoară presiunea din sistemul de injecție generată de pompa 4. Jetul de micropicături de AdBlue ajunge pe suprafața de testare 3, care poate atinge temperaturi cuprinse între cea a mediului ambiant și maxim 873K. Standul permite reglarea la orice temperatură a suprafeței de testare, lucru care se poate realiza prin intermediul plitei cu inducție 1. Hota cu sistemul de ventilație absoarbe vaporii generați prin vaporizare și îi trimite într-un schimbător de căldură răcit cu elemente Peltier 10, astfel încât are loc condensarea acestora.

### 4.2 Echipamentul folosit pentru studiul calefacției la adiția de AdBlue utilizând ultrasunete

Pentru optimizarea eficienței procesului de reducere catalitică a emisiilor prin intensificarea transferului termic și a celui de masă, au fost gândite teste de laborator care permit intensificarea

fenomenului de transfer de căldură între o suprafață plană încălzită și picăturile de AdBlue, prin intermediul unui mediu ultrasonor. Pentru a realiza un astfel de sistem de atomizare care să producă o "ceață" densă cu particule foarte fine de AdBlue (de ordinul a  $10\mu\text{m}$ ), s-a conceput și realizat un sistem magnetostrictiv care generează ultrasunete. Echipamentul este destinat observării procesului de vaporizare și evoluției depunerilor rezultate în urma vaporizării soluției de AdBlue. Se vizează și studiul comportamental al impactului undelor ultrasonore asupra depunerii microscopice a cristalelor de AdBlue pe diferite probe în formă de disc. Întrucât gazele fierbinți împreună cu pelicula de lichid apărută pe disc sub influența undelor ultrasonice duc la apariția fenomenului de calefacție, a fost realizat un stand experimental destinat studierii fenomenului descris. Figura 4.2 prezintă echipamentul utilizat pentru experimente.

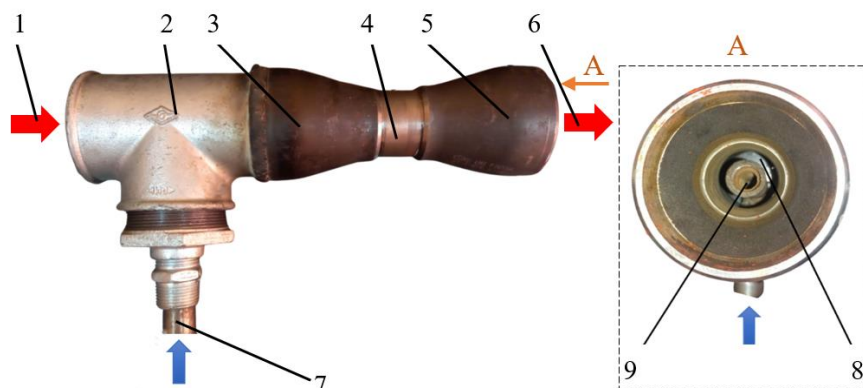


**Fig. 4.2. Echipament experimental pentru studiul procesului de calefacție a soluției de AdBlue.**

Standul este astfel conceput încât să permită analiza procesului de vaporizare a unei singure picături de AdBlue căzută pe un disc fierbinte, supus undelor ultrasonore sau a unui jet injectat. La studiul picăturilor, fluxul de AdBlue notat cu 2, este reglat cu ajutorul unui stalagmometru 5, astfel încât acestea să cadă pe suprafața probei notate cu 3, realizată în formă de disc. Discul este fixat pe vârful unui concentrator magnetostrictiv 4, care produce unde ultrasonore datorită frecvenței de  $20\text{kHz}$  induse de generatorul 1. Picăturile de AdBlue 2 curg perpendicular pe probele 3 în formă de disc, ating discul, apoi se sparg și difuzează într-un fluxul de aer cald generat de suflanta 6. Suflanta este reglabilă și poate asigura valori maxime ale temperaturii de până la  $473\text{K}$ . Temperatura probelor 3 și, implicit, temperatura mediului ambiant sunt monitorizate de senzori de temperatură prin intermediul termometrelor 7.

### 4.3 Realizarea unui sistem de ejecție utilizat pentru amestecarea gazelor de ardere cu picăturile de AdBlue

Pentru a se asigura o distribuție uniformă a gazelor de ardere și a picăturilor injectate de AdBlue, s-a conceput și realizat conform figurii 4.7 un sistem de ejecție, atașabil tubulaturii de evacuare.

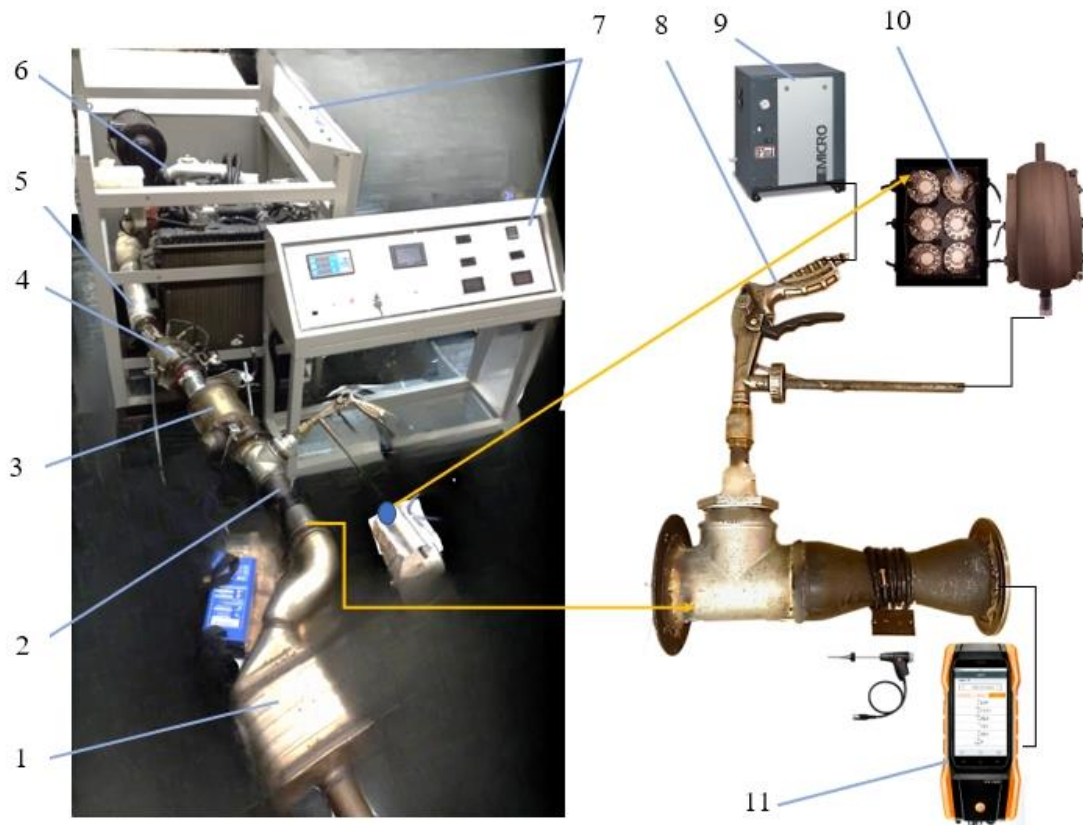


**Fig. 4.7. Sistemul de ejecție utilizat în testele de laborator.**



Gazele care intră în conducta de evacuare sunt direcționate într-un ejector, care utilizează principiul Venturi, pentru a se extrage vaporii de AdBlue formați într-un generator de picături atomizate provenite de la niște celule cu ultrasunete. Scopul acestui ejector este de transport și de amestecare a picăturilor cu gazele de evacuare cu rolul de a îmbunătăți transferul de căldură și procesul de atomizare. Sistemul de ejecție asigură o creștere a vitezei de vaporizare care va conduce la mărirea eficienței de descompunere a ureei în catalizatorul SCR. Gazele de evacuare 1 intră prin partea stângă, străbat secțiunea 2 și pătrund în camera de amestec 3. Întrucât în camera de amestec se află amplasat un ajutor convergent va crește puternic viteza gazelor de evacuare, fenomen care va crea un efect de ejecție care conduce la antrenarea vaporilor de AdBlue prin racordul 7. Secțiunea convergentă 3, cea constantă 4 și difuzorul 5 fac parte din constituția tubului Venturi. Amestecul părăsește ejectorul prin zona 6. În figura din partea dreaptă se poate observa secțiunea 8 de curgere a gazelor și orificiul 9 de extragere a vaporilor de AdBlue.

Conform figurii 4.8, ejectorul va fi montat pe tubulatura de evacuare care încorporează catalizatorul SCR 1, sistemul de ejecție 2, filtrul de particule DPF 3, catalizatorul de monoxid de carbon DOC 4, conducta de evacuare 5 și motorul 6. Pornirea motorului se face folosind panoul de comandă 7, iar cel de măsură și control va furniza informații detaliate privind parametrii motorului. Panoul de control va oferi posibilitatea de a ajusta turația motorului la valorile necesare pentru desfășurarea testelor experimentale.



*Fig. 4.8. Configurația instalației experimentale pentru sistemul de ejecție.*

Procesul de ejecție a soluției de AdBlue va fi gestionat cu ajutorul unei presiuni produse de un compresor cu șurub 9, care are capacitatea de a furniza o presiune de până la  $10 \cdot 10^5 Pa$ . Vaporii de AdBlue generați de către celulele piezoelectrice ale dispozitivului 10 sunt aspirați prin intermediul sistemului de ejecție 8. Întregul sistem de conversie a NOx este conectat la motorul 6, iar gazele generate în timpul experimentelor sunt supuse unei achiziții de date cu ajutorul analizorului de gaze 11.

În figura 4.9 poate fi urmărită structura sistemului de generare a vaporilor de AdBlue.



Fig. 4.9. Sistemului de generare a vaporilor de AdBlue.

Acest dispozitiv va genera vapori prin intermediul a șase celule piezoelectrice notate cu 2, imersate total în soluția de AdBlue. Capacul 4, are rolul de a colecta vaporii de AdBlue eliberați din rezervorul 3. Sistemul de ejecție este conectat la capacul 4 prin sistemul de racordare 1, care este parte integrantă a sistemului de captare și evacuare a vaporilor de AdBlue.

#### 4.4 Contribuții privind sistemul de preîncălzire a gazelor de ardere

Instalația de preîncălzire realizată în laborator dispune de posibilitatea de a încălzi prin inducție electromagnetică suprafața tubulaturii și, implicit, a gazelor de evacuare pe perioada funcționării motorului diesel la rece.

Unitatea de încălzire prin inducție încorporează un generator de înaltă frecvență 2, conectat la bobina cu cinci spire 1 conectată la rândul ei la un modul electronic. Componenta sistemului de preîncălzire cu inducție este dată în figura 4.11.

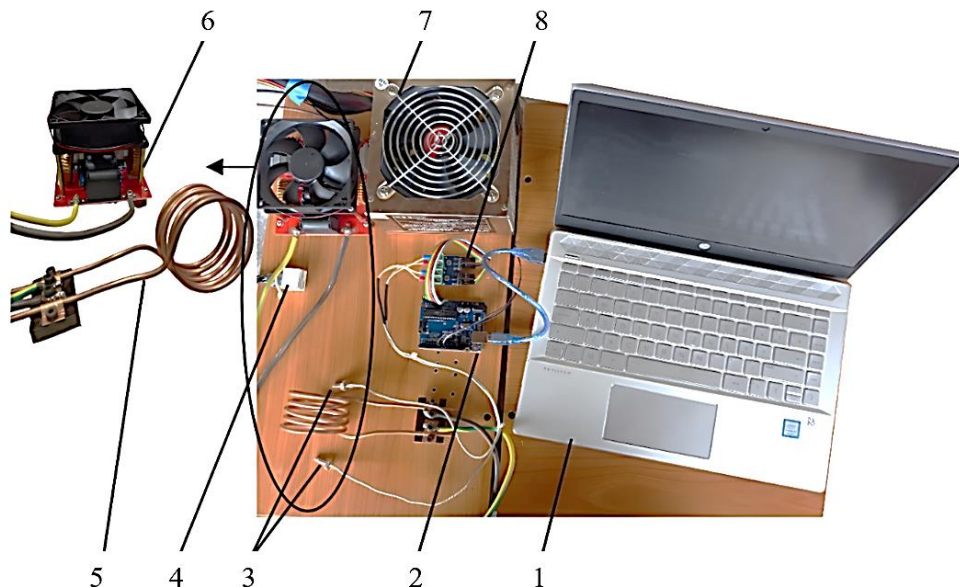


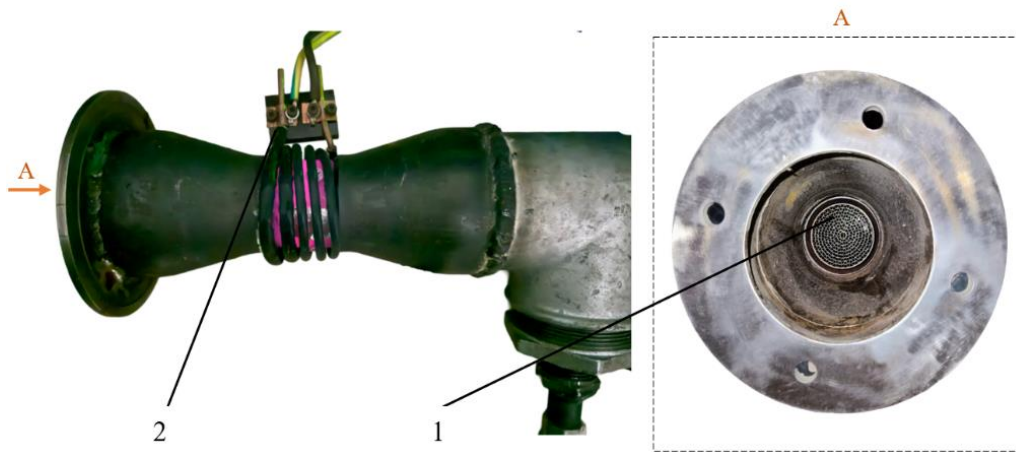
Fig. 4.11. Componenta și părțile de comandă a sistemului inductiv de preîncălzire.

Programarea funcționării între anumite limite predefinite de temperatură ale sistemului de inducție se face prin intermediul unui cod cu ajutorul calculatorului 1 și a plăcii *ArduinoUno* notată cu 2. Limitele de temperatură sunt verificate cu termocuplele 3. Sistemul de preîncălzire va fi activ sau inactiv prin comanda dată de către releul 4, care primește semnal de la placa *ArduinoUno*. Generatorul de frecvență 6 este alimentat de la o sursă de curent 7. Bobina 5 formată din cinci spire înconjoară fagurele metalic și generează un câmp magnetic datorat

curentului care circulă prin aceasta. Gradul de încălzire a sistemului de ejecție în zona fagurelui metalic este verificat prin termocuplele 3. Valorile analogice obținute vor fi convertite analog-digital în codul de programare C++ de către driverele 8, care generează un semnal binar pentru placa de achiziție *ArduinoUno*.

Procesul de funcționare este controlat prin valorile temperaturilor furnizate de către doi senzori, notați cu 3. În momentul în care senzorul ce se află în tubulatura gazelor de evacuare detectează o temperatură mai mică decât cea optimă pentru conversia catalitică, releul 4 va fi activat și va începe procesul de încălzire. Cel de-al doilea senzor va monitoriza temperatura fagurelui metalic și va genera un răspuns cu privire la funcționarea sistemului de inducție (gradul de încălzire). Sistemul de monitorizare a temperaturii va fi conectat la contactul de pornire a motorului. Injecția de AdBlue va debuta în momentul în care temperatura gazelor de evacuare atinge valoarea optimă conversiei chimice.

În figura 4.12 se prezintă montajul de preîncălzire pentru sistemul cu ejecție.



**Fig. 4.12. Montajul sistemului de preîncălzire pe ejector.**

În figură s-a notat cu 1 fagurele metalic din interiorul tubulaturii și cu 2 bobina de inducție care are cinci spire.

Preîncălzirea gazelor de evacuare în cazul funcționării la rece a motorului diesel se utilizează pentru intensificarea vaporizării și creșterii eficacității conversiei picăturilor de AdBlue în catalizatorul SCR.

În figura 4.13 poate fi urmărit fagurele metalic utilizat la preîncălzirea prin inducție (experimental) în interiorul ejectorului.



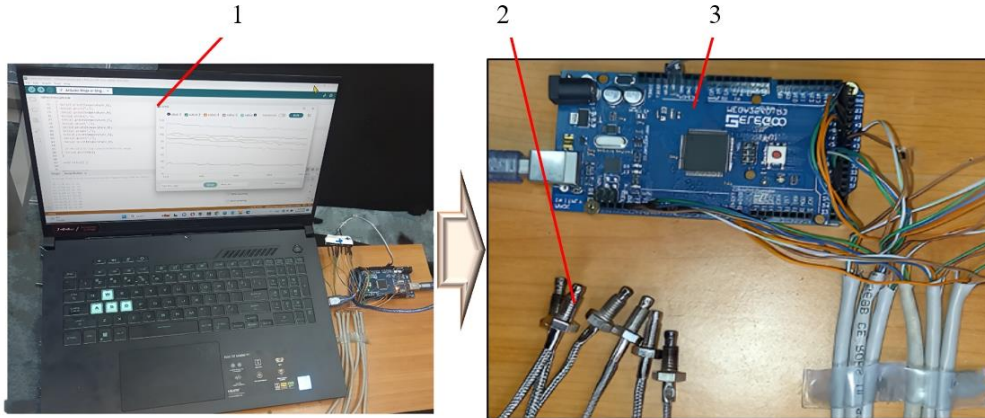
**Fig. 4.13. Fagure metalic folosit la preîncălzirea inductivă a gazelor de evacuare.**

Sistemul din imagine, grație metodei inductive, asigură o încălzire eficientă și rapidă a amestecului picături de AdBlue-gaze de evacuare înainte de a intra în fagurele SCR.



## 4.5 Contribuții privind sistemul de monitorizare a temperaturii gazelor de evacuare la SCR

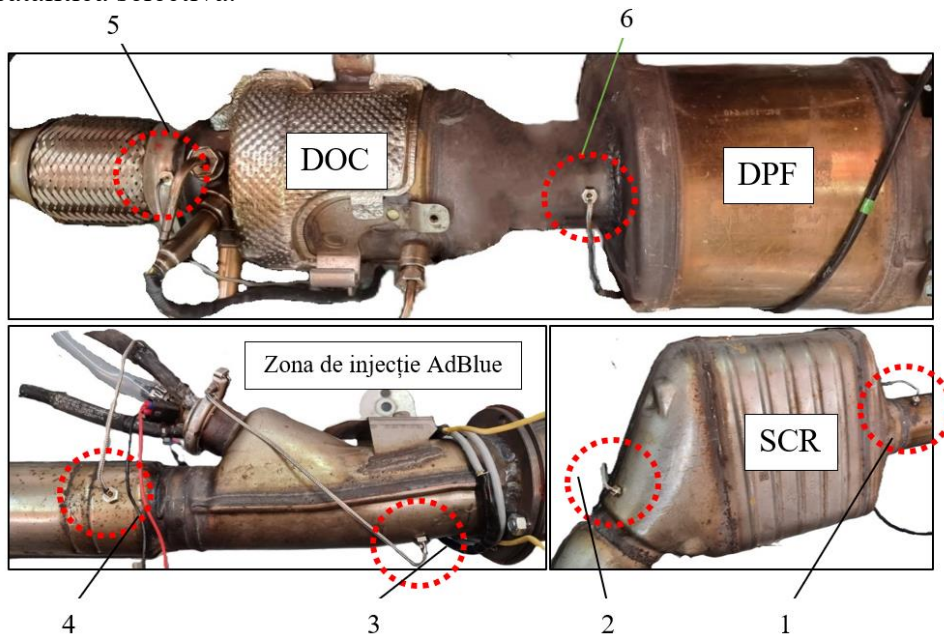
Figura 4.14 ilustrează sistemul realizat în vederea monitorizării temperaturii gazelor de evacuare ale unui motor diesel echipat cu SCR, care include o placă *ArduinoUno* pentru achiziția de date și senzorii aferenți.



*Fig. 4.14. Sistem Arduino de monitorizare a temperaturii gazelor de ardere.*

Cei șase senzori, notați în figură cu 2, sunt conectați la placa de achiziție *ArduinoUno* 3, care transmite în timp real datele colectate către calculatorul 1.

Figura 4.15 reprezintă modul de amplasare a senzorilor de temperatură pe sistemul de reducere catalitică selectivă.



*Fig. 4.153. Amplasarea senzorilor de temperatură pe sistemul SCR.*

Senzorul 1 este amplasat după filtrul SCR și are rolul de a furniza date cu privire la temperatura gazelor evacuate, senzorul 2 este amplasat la intrarea în SCR pentru a măsura temperatura gazelor în timpul descompunerii ureei, iar senzorul 3 monitorizează temperatura în partea opusă injectorului de AdBlue pentru a determina variația de temperatură în timpul injectiei. Senzorul 4 monitorizează temperatura înaintea zonei de injecție, senzorul 5 este amplasat la ieșirea gazelor din motor, înainte de catalizatorul de oxidare DOC, iar senzorul 6 este poziționat la intrarea în DPF.



#### 4.6 Descrierea standului GTAT-T003&GTAT-T009 pentru studiul influenței temperaturii gazelor de evacuare a motoarelor diesel asupra noxelor și formării depunerilor solide la injecția AdBlue în SCR

Determinările experimentale au fost efectuate pe un stand de testare GTAT-T003&GTAT-T009, a cărui elemente componente sunt ilustrate în figura 4.16.



Fig. 4.164. Prezentarea elementelor componente ale standului de testare.

Standul destinat testărilor experimentale este alcătuit dintr-un calorimetru notat cu 1, care permite efectuarea de bilanțuri termice folosind temperaturile gazelor de evacuare la intrarea și la ieșirea din acesta și a temperaturii de intrare/ieșire a unui lichid de răcire. Panoul de măsură și reglare notat cu 2 permite, pe de o parte determinarea în timp real a parametrilor motorului diesel iar pe de altă parte, reglarea turației motorului diesel și a frânei dinamometrice. De asemenea, standul este echipat cu o interfață RS485 și softul M400 destinate trasării caracteristicilor motorului ISUZU 4JB1. Standul mai cuprinde un motor diesel notat cu 3 și o frână dinamometrică 4.

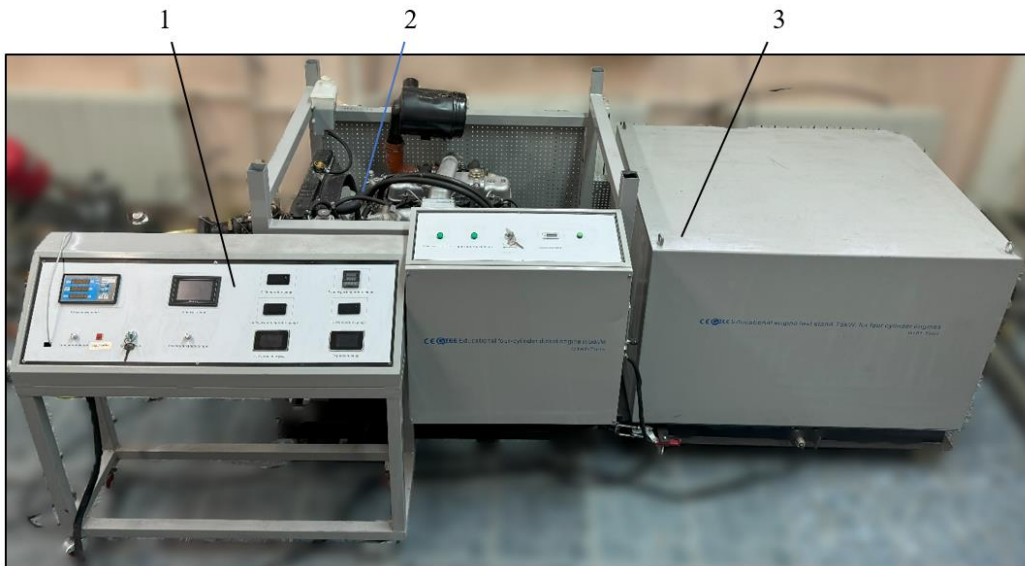
#### 4.7 Prezentarea elementelor componente ale standului experimental

Standul are incorporat un panou pentru măsurarea parametrilor prezentați în tabelul 4.1. Standul permite pentru reglarea turației motorului și a sistemului de frânare dinamometrică.

Tab. 4.1. Parametrii măsurați pe standul motorului diesel.

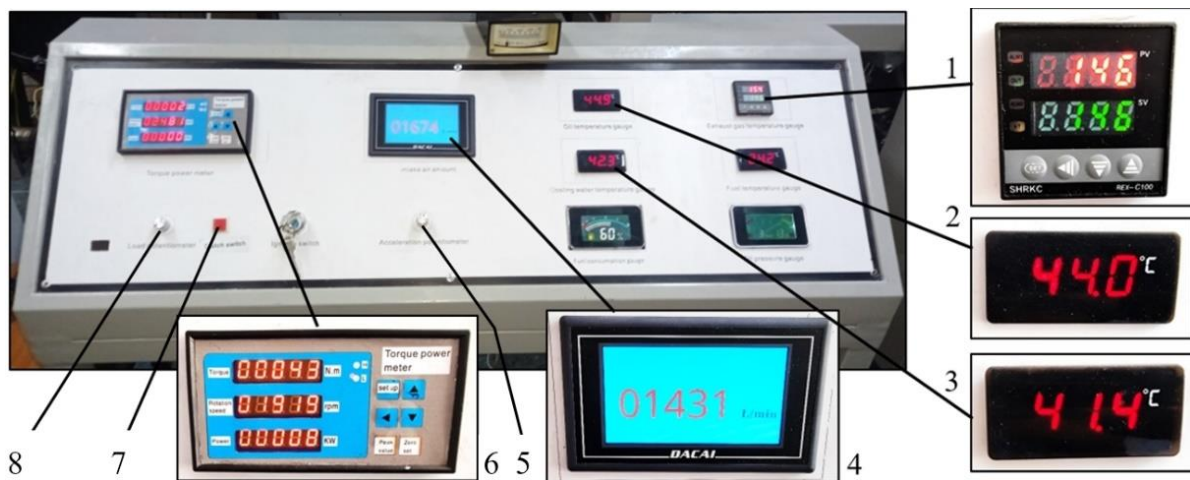
Nr. crt.	Parametrii măsurați	U.M.	Nr. crt.	Parametrii măsurați	U.M.
1.	Turația motorului	[r.p.m]	6.	Debitul de aer	[L/min]
2.	Cuplul motorului	[N·m]	7.	Temperatura lichidului de răcire	[°C]
3.	Puterea motorului	[kW]	8.	Temperatura uleiului	[°C]
4.	Presiunea uleiului	[bar]	9.	Temperatura gazelor de evacuare	[°C]
5.	Consumul de combustibil	[%]	10.	Temperatura combustibilului	[°C]

Standul este echipat cu un sistem de frânare dinamometric care poate fi reglat cu ajutorul unui potențiomtru, funcție de sarcina dorită. Frâna dinamometrică furnizează puterea de frânare necesară în timpul testelor (simularea sarcinii). În figura 4.20 sunt ilustrate elementele componente ale standului de testare.



**Fig. 4.205. Vedere detaliată a elementelor componente ale standului experimental GTAT-T003&GTAT-T009.**

Panoul 1 reprezintă o unitate de măsură și control a parametrilor funcționali care are capabilitatea de a controla și regla motorul diesel 2 cât și unitatea dinamometrică de frânare 3, care induce sarcini motorului. Panoul 1 permite, fie citirea în timp real a valorilor măsurate, fie memorarea acestora prin intermediul unei interfețe seriale RS485 și a unui soft specializat M400 achiziționat cu standul. În figura 4.21 se dă o vedere cu panoul de măsură și o prezentare detaliată a valorilor afișate de stand.



**Fig. 4.21. Panoul de monitorizare a parametrilor motorului diesel.**

În imagine s-a notat cu: 1 - temperatura gazelor de evacuare la ieșirea din motorul diesel, 2 - temperatura uleiului motor, 3 - temperatura lichidului de răcire, 4 - debitul de aer aspirat, 5 - potențiomtru accelerare motor, 6 - valori ale cuplului, puterii și turației, 7 - buton start-stop frână dinamometrică, 8 - potențiomtru reglare frână dinamometrică.

## 5. REZULTATE EXPERIMENTALE ȘI INTERPRETAREA LOR

### 5.1 Planul de experimente utilizat pentru determinarea noxelor și temperaturii la utilizarea sistemului SCR

Procesul de eliminare a NOx în vehiculele dotate cu catalizatoare SCR întâmpină în exploatare câteva etape critice care influențează rezultatele și eficiența. Un astfel de caz apare la creșterea emisiilor de NOx pe timpul pornirii la rece a motorului diesel, când sistemul SCR prezintă dezavantaje notabile. Aceste dezavantaje sunt, de regulă, legate de temperaturile scăzute ale catalizatorului, care duc la diminuarea semnificativă a ratei de conversie a NOx. În această fază, rapiditatea cu care catalizatorul se încălzește poate menține emisiile de NOx la un nivel minim, însă apare dezavantajul creșterii emisiilor de CO<sub>2</sub>.

Un alt aspect important este dat de faptul că, atunci când catalizatorul SCR este uscat și rece, acesta poate absorbi NOx, asigurând emisii zero de NOx prin tubulatura de evacuare. Cu toate acestea, dificultățile apar în momentul în care vaporii de apă din gazele de evacuare ajung la catalizatorul SCR. Acești vapori se condensează pe zeolitul catalizatorului, fapt care conduce la o creștere bruscă a temperaturii. Acest conținut de apă provine atât din combustibilul ars, cât și din umiditatea din aerul de admisie. Creșterea temperaturii are ca rezultat încetarea absorbției de NOx, urmată de o desorbție parțială a noxelor stocate, fiind apoi reduse de amoniacul (NH<sub>3</sub>) disponibil pe catalizator. Durata întregului proces variază în funcție de debitul masic al gazelor de evacuare, concentrația de apă din gaze și temperatura acestora. De asemenea, apa condensată în catalizator afectează capacitatea sa de stocare a NOx și reduce timpul necesar pentru întregul proces de purificare a gazelor de evacuare.

Experimental, pentru a monitoriza eficiența sistemului și a limita emisiile, catalizatorul de la ieșirea sistemului SCR a fost conectat la un analizor de gaze și la o supapă de contrapresiune pentru hidrocarburi și NOx. Cantitatea de NOx rezultată în emisii a servit ca indicator al eficienței studiului asupra sistemului SCR.

Testele de pornire la rece s-au desfășurat la aceeași temperatură ambientală, într-o încălț climatică. La începutul fiecărui test de pornire la rece, temperaturile uleiului și lichidului de răcire ale motorului au fost măsurate cu echipamentul de măsură de pe standul experimental. Fiecare test a implicat modificarea turației motorului și a nivelului de frânare la praguri prestabilite. Cu ajutorul analizorului de gaze s-a măsurat concentrația emisiilor de NOx în condițiile date. Ciclurile de testare s-au efectuat pentru două cazuri: tabelul 5.1 - fără aplicarea preîncălzirii și cu aplicarea preîncălzirii.

**Tab. 5.1. Cicluri de testare ale motorului diesel pe stand cu și fără aplicarea preîncălzirii.**

Configurație motor diesel ISUZU 4JB1 – cu/fără preîncălzire								
Fără SCR, fără injecție de AdBlue					Cu SCR, injecție AdBlue cu injector Cu SCR, eiecție AdBlue, cu celule piezoelectrice			
Nr. crt.	Turație	Sarcină	Cuplu	Putere	Sarcină	Turație	Sarcină	Turație
	[r.p.m.]	[%]	[Nm]	[kW]	[%]	[r.p.m.]	[%]	[r.p.m.]
1	750 (fără)	0%	0	0	750 (fără)	0%	0	0
2	2300	25%	56	13,487	2300	25%	56	13,487
3		50%	111	26,734		50%	111	26,734
4		75%	167	40,233		75%	167	40,233
5		100%	245	53,645		100%	245	53,645

## 5.2 Contribuții privind analiza calorimetrică la descompunerea ureei în timpul transferului termic

În sistemul SCR, descompunerea ureei și, implicit, generarea amoniacului au loc în trei faze. În prima fază, apa este evaporată din picăturile de AdBlue, în cea de-a doua are loc descompunerea ureei datorită procesului de termoliză iar în cea din urmă fază are loc producerea de amoniac ( $\text{NH}_3$ ) și acid izocianic ( $\text{HNCO}$ ). Descompunerea ureei, conform literaturii de specialitate, [BF07], poate avea loc în faza gazoasă și în faza solidă. Ureea solidă se evaporă în uree gazoasă, care se descompune în amoniac și acid izocianic. Întrucât ureea gazoasă este instabilă, [BF07], procesul de descompunere are loc în stratul limită al picăturii. Dacă temperatura este suficient de ridicată ( $673\text{K}$  sau mai mare), acidul izocianic în stare gazoasă este stabil și poate fi transformat cu ușurință printr-o reacție de hidroliză, în amoniac și dioxid de carbon. Dacă se consideră că picăturile de AdBlue ajung pe suprafața catalizatorului oxidant, [YS04], transformarea are loc la temperaturi mai scăzute. În cadrul cercetărilor efectuate, fazele prin care trece soluția de AdBlue au fost analizate experimental cu ajutorul unui calorimetru cu scanare diferențială. În figura 5.1 sunt date rezultatele obținute în procesul termodinamic, prin tehnica DSC.

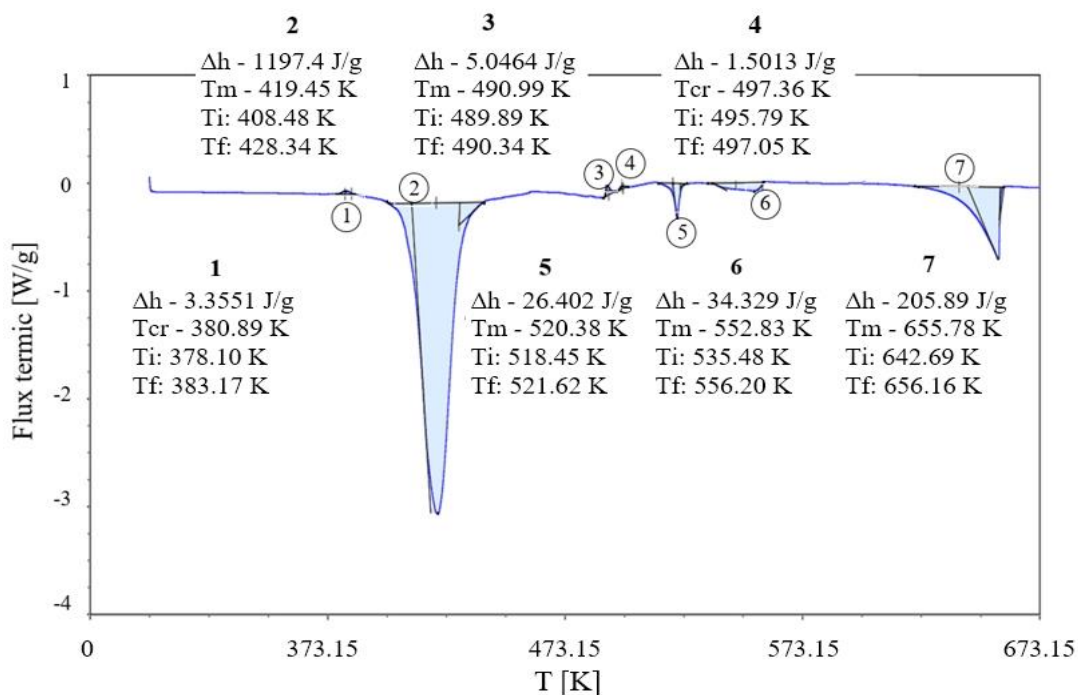


Fig. 5.1. Rezultatele obținute prin scanarea diferențială (DSC) a soluției de AdBlue.

Descompunerea ureei este determinată pe baza echilibrului termodinamic format de: biuret, triuret și acid izocianic. Triuretul reacționează apoi pentru a forma reziduuri solide de acid cianuric și amelură. Acidul cianuric sublimează la temperaturi de peste  $573\text{K}$ , [TS19]. Experimental, s-a adăugat o cantitate de  $4,1\text{mg}$  soluție de AdBlue (cântărită cu precizie) într-un creuzet de aluminiu, care a fost ulterior etanșat ermetic. De asemenea, un creuzet gol a fost introdus în aparat ca punct de referință. Analiza s-a desfășurat într-un regim controlat, și anume, o primă etapă de echilibrare la temperatura de  $298\text{K}$ , urmată de o creștere constantă a temperaturii cu  $2\text{K}/\text{min}$  până la atingerea valorii de  $673\text{K}$ , iar, în final, o fază de răcire de la  $673\div 298\text{K}$ . În funcție de tranzițiile termice observate de la stânga la dreapta pe graficul din figura 5.1, se pot stabili procesele:

- **cristalizarea** (1): reprezintă procesul de eliminare a apei din probă, evidențiat pe grafic prin variații în curba de încălzire, unde temperatura de cristalizare ( $T_c$ ) indică momentul de debut și sfârșit al acestui proces, iar  $\Delta h$  reprezintă entalpia asociată cristalizării;



- **topirea ureei** (2): evidențiată printr-un punct distinct ( $T_m$  - temperatura de topire), care reprezintă momentul în care ureea solidă se transformă într-un lichid, și este marcată printr-un vârf ascuțit pe curba de încălzire;
- **eliminarea ureei** (3 și 4): substanța se descompune sau se volatilizează, tranziții care pot oferi informații despre procesele de descompunere ale ureei la temperaturi specifice;
- **topirea biuretelui** (5 și 6): este o etapă de transformare termică a unei componente prezente în probă, care oferă detalii despre proprietățile termice ale biuretelui;
- **descompunerea acidului cianuric în izocianic** (7): o reacție chimică complexă care poate fi investigată utilizând datele din analiza termică.

Pentru exploatarea sistemelor SCR, un interes deosebit îl prezintă studiul mecanismelor de eliminare a reziduurilor rezultate din procesele chimice. Analiza calorimetrică evidențiază trei etape de descompunere a soluției de AdBlue:

- amestecul lichid uree-biuret,
- tranziția biuret-triuret;
- sublimarea acidului cianuric.

În cadrul etapei biuret-triuret, rezultatele graficului au variat la temperaturi mai scăzute, existând o schimbare de fază în jurul valorii de  $473K$ , când cantitatea de uree s-a consumat.

### 5.3 Contribuții aduse la punerea în evidență a procesului de pseudo-desublimare a picăturilor de AdBlue

După cum s-a arătat în &2.2, pentru studiul pseudo-desublimării soluției de AdBlue la contactul picăturilor injectate pe o suprafață fierbinte, a fost conceput un stand experimental prezentat în detaliu în figura 2.1, realizat conform figurii 4.1.

Utilizarea standului de studiere a pseudo-desublimării, permite:

- să se observe dacă apar sau nu depuneri solide pe suprafața pe care sunt injectate picăturile de AdBlue;
- să se studieze modelul formării depunerilor sărurilor solide la suprafață;
- să se stabilească la ce prag al temperaturii încep să se formeze depuneri;
- să se analizeze cum se modifică procesul de depunere în dependență de creșterea temperaturii;
- să se verifice dacă există mijloace de evitare a formării sau eliminării depunerilor sărurilor de AdBlue;
- să se studieze care este influența temperaturii gazelor de evacuare asupra mecanismului de apariție a depunerilor și asupra structurii sărurilor de AdBlue folosind procedee termografice și filmări rapide;
- să se observe prin microscopie electronică și digitală dacă se formează depuneri pe partea frontală a fagurelui catalizatorului SCR sau în microcanalele acestuia.

Standul are capacitatea de a permite ca experimentele să fie efectuate la diferite temperaturi, pentru a se putea vizualiza apariția și dezvoltarea fenomenului de pseudo-desublimare, precum și a condițiilor de producere a reziduurilor, în cazul unei mixturi de AdBlue.

În continuare, este prezentat un *extras* cu cele mai semnificative rezultate obținute pe standul destinat studiului pseudo-desublimării. În ANEXA 7 sunt date marea majoritate a rezultatelor obținute pentru studiul pseudo-desublimării.

În figurile 5.2÷5.5, sunt prezentate cadre extrase din filmările rapide de laborator, efectuate cu  $240fps$  folosind camera TROUBLESHOOTER, model TSHRCS. În fiecare figură, filmările au fost efectuate la parametri experimentali constanți, menținându-se temperatura suprafeței pe care se injectează picăturile de AdBlue, timpii și debitul de injecție.

Ca factori de influență a temperaturii asupra procesului de pseudo-desublimare s-a constatat că rezultatele experimentale efectuate pe stand arată că rata de creștere a cristalelor depinde de

temperatura de lucru, care ar putea fi controlată prin metode eficiente de preîncălzire, imediat după pornirea motorului diesel.

În figura 5.2 valorile marcate cu roșu reprezintă numărul cadrelor alese pentru identificarea procesului de descompunere a soluției de AdBlue, în vederea vizualizării fenomenului de pseudo-desublimare.

### 1. Injecție de AdBlue la debutul fenomenului de vaporizare ( $T \leq 373K$ )

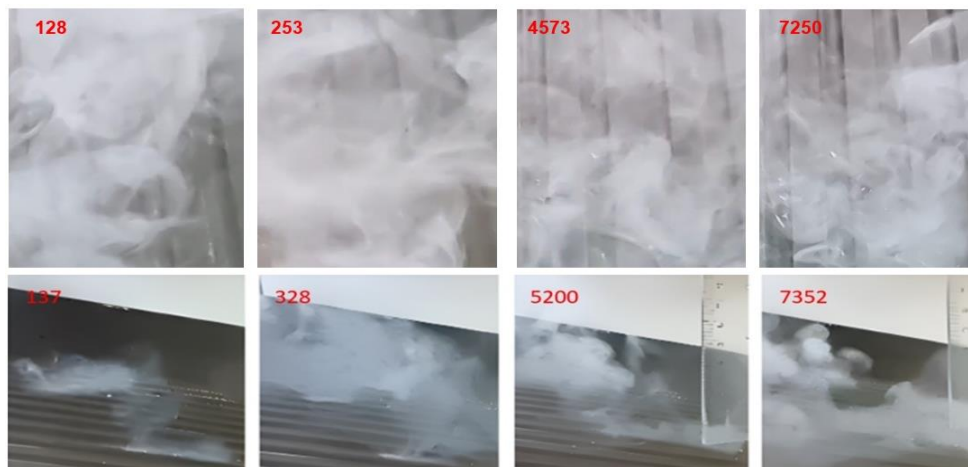


Fig. 5.2. Injecție de AdBlue la debutul fenomenului de vaporizare, fără apariția depunerilor.

Debutul procesului de vaporizare corespunde pornirii motorului diesel și funcționării acestuia la rece când se atinge temperatura de saturație. În acest caz, într-o primă etapă, temperatura suprafeței pe care se face injecția de AdBlue este sub pragul valorii de saturație, caz în care UEC a motorului nu comandă injecția. Când se depășește ușor temperatura de saturație, UEC comandă injectorul de AdBlue, caz în care picăturile încep să se vaporizeze fără să apară însă fenomenul de pseudo-desublimare. S-a constatat experimental că, în această perioadă, jetul injectat întâlnește pereții fierbinți ai tubulaturii și pot ajunge în catalizatorul SCR, fie în stare de picături lichide, fie sub forma unei mixturi vapori-picături atomizate. Se poate afirma că pentru funcționarea la rece a motorului diesel sistemul SCR nu funcționează optim. Valorile scăzute ale temperaturii în ansamblul SCR are drept consecință, pe de-o parte, absența conversiei catalitice a soluției de AdBlue, iar, pe de altă parte, înregistrarea unui nivel ridicat al noxelor pe bază de azot.

### 2. Injecție cu vaporizarea AdBlue și debut proces de pseudo-desublimare ( $T \in 373 \div 408K$ )

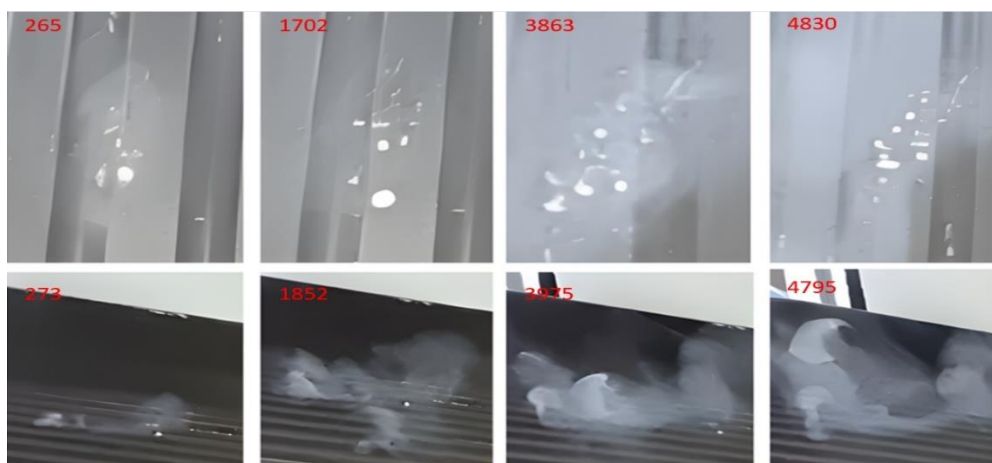


Fig. 5.3. Dezvoltare proces de vaporizare și debut pseudo-desublimare.

Soluția de AdBlue conține o cantitate de 32,5% uree și 67,5% apă demineralizată. Injectată în gazele de evacuare, soluția de AdBlue reduce emisiile de oxizi de azot ( $NO_x$ ) și este în conformitate cu normele de poluare Euro IV, V și VI. Specificațiile pentru AdBlue, indică, conform ISO 22241, că punctul de fierbere este de 373K. Cu alte cuvinte, orice valoare a temperaturii care depășește acest prag în momentul în care este injectată soluția de AdBlue va conduce la dezvoltarea unui proces de vaporizare. Peste un anumit prag al temperaturii apare debutul și, apoi, dezvoltarea procesului de pseudo-desublimare după un mecanism care a fost descris pe larg în &2.2. Experimentele au ca scop să dovedească apariția acestui fenomen.

În figura 5.3 se observă cu ușurință apariția unor formațiuni solide care, în acest stadiu, aderă parțial la suprafața fierbinte. Grăunții formați au, de regulă, dimensiuni de ordinul a 2-3mm. Fenomenul este vizibil și se dezvoltă chiar și în cazul injectării la debite scăzute a unor picături mici. De regulă aceste formațiuni aderă parțial la pereți, temperatura fiind relativ scăzută.

### 3. Dezvoltarea procesului de pseudo-desublimare, ( $T \in 408 \div 523K$ )

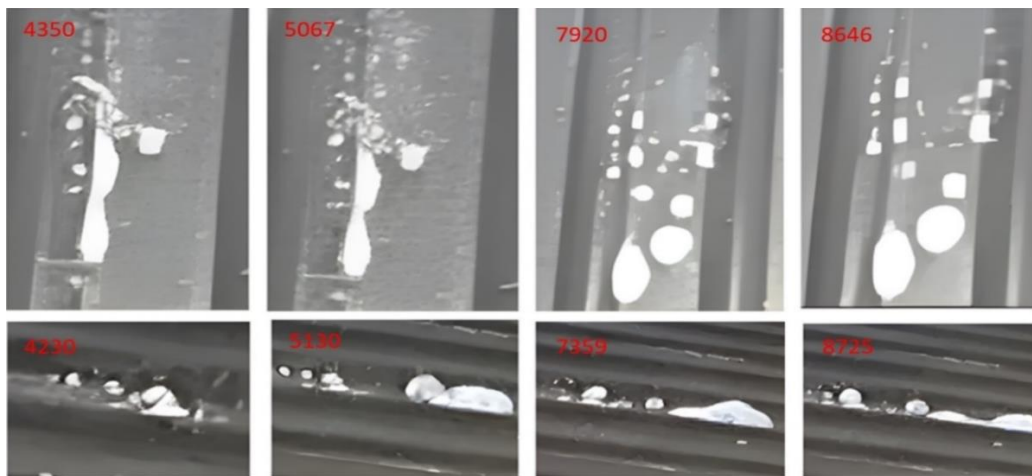


Fig. 5.4. Dezvoltarea procesului de pseudo-desublimare.

La temperaturi de peste 408K, se observă din figura 5.4, că apar depuneri ale sărurilor de AdBlue pe suprafața încălzită, mult mai dezvoltate ca dimensiune (2-7mm) față de cazul precedent, concomitent cu reducerea ratei de vaporizare. Acest aspect se poate explica prin faptul că, nivelul de temperatură este mai ridicat. Spre deosebire de cazul precedent, în acest caz depunerile solide au tendința de a se deplasa pe suprafață.

### 3. Apariția fenomenului de deflagrație a formațiunilor solide la pseudo-desublimarea cu temperaturi foarte ridicate ( $T > 523K$ )

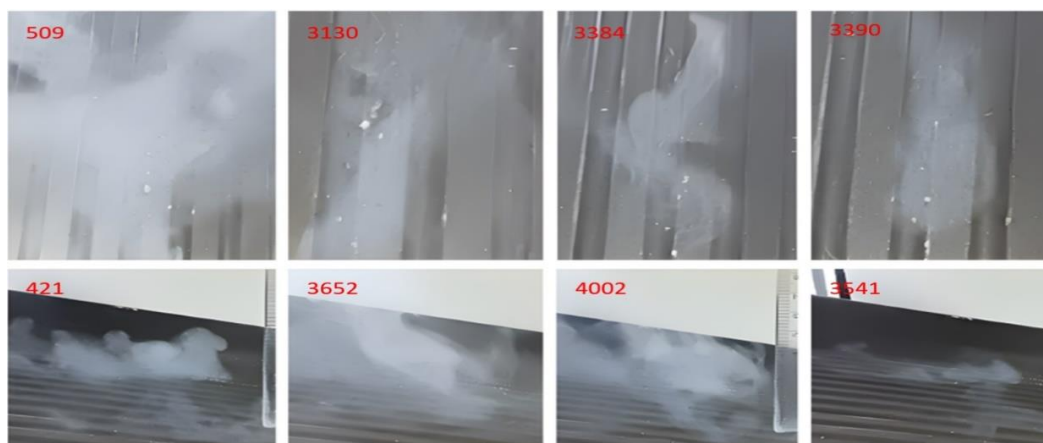


Fig. 5.5. Apariția fenomenului de deflagrație a formațiunilor solide la pseudo-desublimare.

La temperaturi superioare, ( $T > 523K$ ) s-a observat o creștere instantanee a ratei de vaporizare a apei din soluția de AdBlue, pusă pe seama faptului că fenomenele decurg atât de rapid, încât partea solidă se desprinde în bucăți micrometrice, printr-un fenomen de deflagrație. După cum se observă din figura 5.5, doar izolat rămân mici formațiuni solide (1-2mm).

*Cercetările experimentale efectuate indică faptul că reglarea temperaturii în interiorul sistemului SCR, poate contribui la evitarea formării depunerilor solide în zona de injecție și în microcanalele catalizatorului SCR.*

Prin urmare, temperaturile mai scăzute favorizează formarea de cristale și apariția depunerilor soluției de AdBlue, în timp ce temperaturile mai ridicate conduc la vaporizarea rapidă și reducerea reziduurilor. Prin experimentele efectuate, rezultă fără echivoc că între anumite praguri de temperatură ale gazelor de evacuare apar și se dezvoltă săruri de AdBlue sub forma unor depuneri solide, fapt care poate fi legat de nivelul temperaturii din procesul de evacuare a gazelor de ardere, cât și de starea termică a motorului diesel.

#### 5.4 Analiza prin microscopie cu scanare diferențială SEM a morfologiei cristalelor rezultate în urma pseudo-desublimării

Pentru evaluarea științifică a influenței temperaturii asupra formării depunerilor solide de AdBlue, s-au efectuat investigații detaliate destinate studiului morfologia cristalelor prin microscopie electronică de scanare (SEM).

Figura 5.6 ilustrează structurile cristaline care s-au format în urma procesului de evaporare a apei distilate din soluția de AdBlue, la o temperatură de 423K.

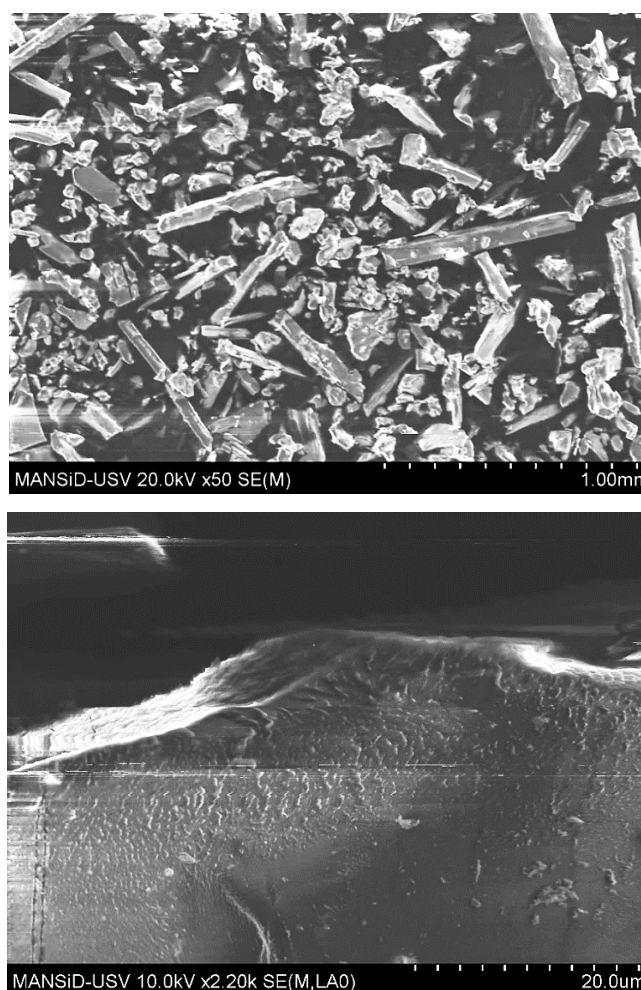
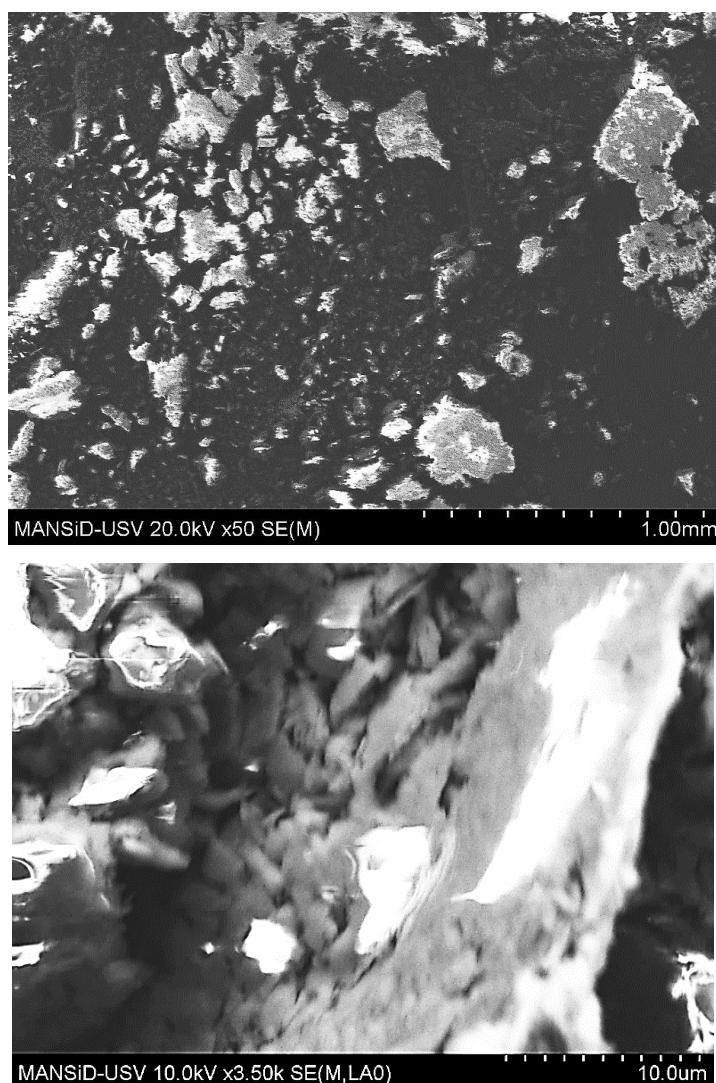


Fig. 5.6. Studii SEM ale depunerilor de AdBlue la temperatura de 423K.



În figura 5.6 este reprezentată structura cristalină a ureei la un ordin de mărire de 50x, iar mai jos un detaliu, la un ordin de mărire de 3500x. Analiza SEM permite elucidarea diferențelor morfologice și fizice ale depunerilor, concentrându-se pe variațiile de formă, pe cele dimensionale și pe aspectul granulelor în diverse condiții termice. Probele au fost expuse la un interval de temperatură cuprins între 373-873K, astfel încât să fie acoperit un spectru larg de condiții posibile pentru depunerea ureei în sistemul de evacuare. Această observație este în concordanță cu datele prezentate în diagrama din subcapitolul 5.1, figura 5.1, care indică inițierea procesului de topire a ureei într-un interval de temperatură cuprins între 408K și 428K. Topirea parțială a ureei la temperaturi relativ moderate sugerează o tranziție de fază în compoziția chimică a soluției, reflectând o modificare semnificativă a structurii moleculare a ureei, în contextul unui proces termic activ. În plus, fenomenul de vaporizare a apei distilate la temperaturi de peste 373K contribuie la concentrarea soluției de AdBlue, facilitând astfel formarea cristalelor de uree.

Figura 5.7 prezintă rezultatele experimentale pentru probele expuse la o temperatură de 523K.



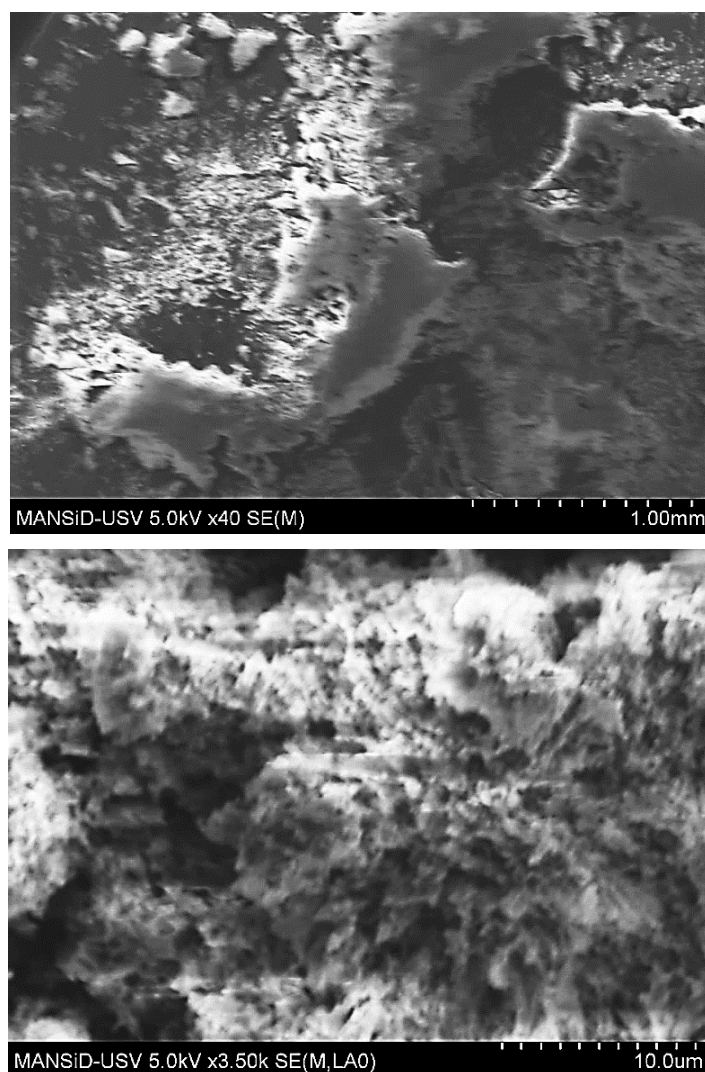
**Fig. 5.7. Studii SEM ale depunerilor de AdBlue la temperatura de 523K.**

În figura 5.7 este reprezentată structura ureei la temperatura de 523K, la un ordin de mărire de 50x, iar în partea inferioară detaliul la un ordin de mărire de 3500x. Valoarea termică aleasă se încadrează, potrivit diagramei calorimetrice, punctului critic în care ureea începe să se descompună. Procesul de încălzire până la pragul de 523K, induce transformări termice

progresive ale ureei, care conduc la tranziții de fază spre biuret, care se finalizează la 520,23K, lucru indicat în diagrama calorimetrică. Ulterior, se observă fenomenul de topire a biuretilui la o temperatură puțin mai ridicată de 521,47K, moment în care începe formarea acidului cianuric. Această secvență de evenimente termice subliniază comportamentul complex al ureei și derivaților săi în cadrul unui interval de temperaturi înalte, evidențiind etapele succesive de descompunere și transformare chimică. La temperaturi ridicate, transformarea ureei în biuret și, ulterior, în acid cianuric, arată existența unui proces dinamic și în etape, caracteristic pentru compușii chimici cu multiple tranziții de fază.

Din perspectiva analizei microscopice, schimbarea de la o structură cristalină bine articulată la o formă mai fluidă și vâscoasă semnalează o tranziție de fază semnificativă a reziduurilor. Această tranziție este caracterizată de o pierdere a structurii cristaline rigide, ceea ce indică o creștere a mobilității moleculare pe măsură ce temperatura crește și materialul trece într-o fază topită. Această schimbare în textură și structură poate fi atribuită proceselor termice care perturbă aranjamentele cristaline regulate ale ureei, conducând la formarea unei faze amorfe și fluide. În plus, imaginea de detaliu oferă o perspectivă asupra naturii vâscoase a materialului în starea sa topită.

Figura 5.8 ilustrează structura ureei atunci când este expusă la o temperatură de 873K, o condiție care nu a fost inclusă în analiza calorimetrică dată fiind capacitatea aparatului DSC.



*Fig. 5.8. Studii SEM ale depunerilor de AdBlue la temperaturi de 873K.*

Având în vedere faptul că temperatura în tubulatura de evacuare a gazelor de evacuare și a catalizatorului SCR poate să se apropie de  $873K$ , s-a propus explorarea procesului de schimbare de fază la un astfel de prag superior. Conform datelor calorimetrice, procesul de descompunere a acidului cianuric în acid izocianic, are loc într-un interval de temperatură cuprins între  $655-673K$ . Textura substanței solide depuse la injecția de AdBlue pe suprafețe fierbinți după aceste temperaturi este ilustrată în figura 5.8. Aceasta prezintă o structură cu textură poroasă, în special în imaginea de detaliu. Referindu-ne la magnificarea de  $40x$ , prezentată în figura de referință (partea de sus), se observă o schimbare morfologică pronunțată, cu o textură care amintește de un material spongios, având extensii poroase la extremități. Această structură sugerează modificări semnificative în compoziția chimică și în aranjamentul molecular al ureei sub influența temperaturilor cu valori de peste  $773K$ . Acest tip de structură poate fi asociat cu procese ale unor descompuneri termice avansate cu formarea de noi compuși sau faze, reflectând complexitatea reacțiilor chimice care au loc la aceste temperaturi extreme.

## 5.5 Contribuții aduse la evidențierea apariției reziduurilor de uree în zona de injecție și pe fagurele SCR la adăugarea de AdBlue

În sistemele SCR actuale, atunci când temperatura gazelor de evacuare este mare și depășește pragul de  $408K$  iar debitul de AdBlue este scăzut, se pot forma depuneri (biuret, CYA), în regiunea de impact cu suprafețele fierbinți din zona de injecție și chiar în cea a fagurelui. Depunerile de săruri apărute în procesul de adăugare al soluției de AdBlue la SCR pot:

- adera la suprafața pe care se injectează AdBlue;
- fi ”spălate” de noul val de picături de AdBlue;
- nu aderă la suprafață (sau doar parțial) la temperaturi ridicate ale suprafeței când apare fenomenul de deflagrație a sărurilor;

Depunerile solide, o dată ce au aderat la suprafața tubulaturii de evacuare sau la fagurele catalizatorului SCR, vor fi expuse noxelor și temperaturii, fenomen care face ca în timp acestea să *îmbătrânească, să își schimbe culoarea și să se așeze în plăci distincte.*

S-a constatat experimental că pot să apară depuneri de reziduuri solide ale sărurilor de AdBlue în:

- zona adiacentă injecției de AdBlue, pe injector și pe suprafețele tubulaturii de evacuare;
- frontal, la intrarea în fagurele catalizatorului sistemului SCR, cât și în microcanalele acestuia.

Cercetările efectuate au avut ca obiectiv să pună în evidență aspecte prezentate.

### 5.5.1 Determinări experimentale care confirmă depunerea reziduurilor de uree în zona de injecție a soluției de AdBlue

Pentru a demonstra experimental punerea în evidență a depunerii și îmbătrânirii reziduurilor de uree în timp, pentru sistemul SCR utilizat la motorul ISUZU 4JB1, după efectuarea unor cicluri de testări la mers în gol și în sarcină.

Ciclurile de funcționare au cuprins testări la rece sau la cald, în regim normal de funcționare sau la diferite sarcini. Utilizând dispozitivul electronic de comandă și control al sistemului de injecție din figura 4.3, au fost exploatate diferite niveluri ale perioadei de injecție T, folosind potențiometrul R1. De asemenea, cu ajutorul potențiometrului R2, s-au modificat diferite valori ale duratei impulsului de injecție a soluției de AdBlue. După cum s-a mai spus, primele setări sunt asociate cu frecvența deschiderii injectorului, în timp ce următoarele setări sunt legate de variația cantității de AdBlue livrată în perioada în care injectorul rămâne deschis.

Procesul de fragmentare a picăturilor de AdBlue este direct legat de scăderea diametrului acestora, dimensiunile situându-se în intervalul  $30\div 100\mu m$ . Pe lângă dimensiunea picăturilor, există și alți factori care contribuie la favorizarea apariției depunerilor sărurilor de AdBlue.

S-a constatat experimental că unul dintre cei mai puternici factori de influență asupra depunerilor o are temperatura gazelor de evacuare. Tot ca factori de influență amintim și presiunea, vâscozitatea picăturilor și tensiunea superficială a acestora. Presiunea de injecție are un impact semnificativ asupra procesului de pulverizare, picăturile fiind complet formate și atomizate în doar  $2ms$ , la o presiune de injecție de  $5 \cdot 10^5 Pa$ . Atomizarea timpurie și fragmentarea picăturilor sunt benefice pentru amestecarea cu gazele de evacuare și vaporizarea acestora. Picăturile mai mici se vaporizează mai rapid atât în timpul fenomenelor convective cu transport de masă cât și la impactul cu peretele conductei de evacuare. În acest ultim caz pot să apară reziduuri (depuneri solide de săruri) pe suprafața tubulaturii. Fenomenul de amestecare a picăturilor cu gazele de evacuare poate contribui la intensificarea vaporizării și la reducerea NOx din catalizatorul SCR, fapt care duce la scăderea probabilității de a se forma depuneri.

S-a constatat experimental că pot să apară depuneri ale sărurilor solide de AdBlue în diferite zone adiacente injectorului, ba chiar și pe duza acestuia. În continuare sunt prezentate imagini obținute prin cercetările efectuate care dovedesc cele afirmate.

Într-o primă etapă a fost investigată canalizația premergătoare amestecătorului de gaze al SCR, adică periodic au fost preluate imagini cu un microscop digital portabil care asigură o magnitudine de mărire de  $1600x$ . S-a constatat experimental, așa cum se vede în cele două imagini ale figurii 5.9 că după o perioadă de funcționare apar formațiuni aciculare incipiente ale formării sărurilor soluției de AdBlue.



*Fig. 5.9. Apariția incipientă a formațiunilor aciculare ale sărurilor de AdBlue, în zona tronsonului de injecție.*

În partea centrală a paletelor mixerului gazelor de evacuare (stânga imaginii 5.10) și pe pereți (dreapta imaginii 5.10) este pusă în evidență tot prin microscopie digitală, apariția biuretelui și acidului cianuric remarcate prin culoarea gălbuie spre vișiniu. Nuanța de culoare mai roșiatică este datorată componentilor din gazele de evacuare.



*Fig. 5.10. Îmbătrânirea depunerilor ureei în zona tronsonului de injecție, detalii.*



După finalizarea determinărilor pe standul motorului diesel, s-au decupat porțiuni din sistemul SCR care prin prezumție ar fi conținut depuneri sub diferite forme. Pentru evidențierea existenței depunerilor s-a apelat la tehnica vizualizării prin microscopie digitală, care permite mărituri de ordinul a 1600x.

Figura 5.11 reprezintă mixerul gazelor de evacuare aflat în componența SCR în zona adiacentă sistemului de injecție a soluției de AdBlue, înainte de efectuarea testelor.



*Fig. 5.11. Starea inițială a mixerului SCR și a injectorului de AdBlue înainte de efectuarea testelor.*

Analizând cele două figuri se constată că la debutul determinărilor experimentale nu există depuneri nici pe mixerul gazelor de evacuare și nici pe duza injectorului. Figura 5.12 relevă apariția depunerilor de săruri în stare solidă sub forma unei pelicule pe peretele tubulaturii din avalul mixerului, cât și pe duza injectorului la finalizarea ciclului de încercări.



*Fig. 5.12. Depuneri pe mixerul și injectorul SCR după un ciclu de încercări.*

După efectuarea testelor, se remarcă că în zona mixerului de gaze SCR, cât și pe duza injectorului au apărut o serie consistentă de depuneri ale sărurilor de AdBlue. În zona mixerului de gaze al SCR există formațiuni sub formă de blocuri care tind să obtureze trecerea gazelor de ardere prin zona centrală. În mod similar, s-a format o cantitate mare de depuneri pe injectorul de AdBlue, care în timp, pot conduce la apariția unei injecții defectuoase a jetului de AdBlue cum ar fi întreruperi totale sau parțiale ale jetului, devierea jetului, modificarea aleatorie a debitului. Figura 5.13 arată evoluția depunerilor sărurilor de AdBlue în timp, pe tronsonul aferent zonei de injecție, cât și efectul îmbătrânirii acestora în zona amestecătorului.



*Fig. 5.13. Efectele îmbătrânirii depunerilor sărurilor de uree pe mixerul SCR.*

Cercetările efectuate pun în evidență impactul depunerilor asupra zonei adiacente injectorului de AdBlue, arătându-se că pot să apară defecțiuni ale injectorului cât și astuparea parțială a canalizației dintre paletele amestecătorului gazelor de evacuare.

### 5.5.2 Determinări experimentale care confirmă depunerea reziduurilor de uree în zona fagurelui catalizatorului SCR

În zona fagurelui catalizatorului SCR, teoretic ar trebuie să ajungă doar vapori de AdBlue. Totuși regimurile de funcționare la rece ale motorului diesel pot face ca temperatura gazelor de evacuare să fie sub pragul de  $373K$ , caz în care nu se atinge valoarea temperaturii de saturație. În acest caz, în loc ca în catalizatorul SCR să pătrundă doar vapori de AdBlue, în acesta vor pătrunde picături lichide. Deci, atunci când debitul gazelor de evacuare este mare, iar temperatura este peste un anumit prag, s-a prezumat teoretic că în regiunea de impact cu fagurele se pot forma depuneri (biuret, CYA), iar acestea pot suferi o îmbătrânire în timp. Cercetările efectuate pun în lumină apariția depunerilor, dezvoltarea și îmbătrânirea acestora, cu precădere în cazul exploatării la rece a motorului diesel. Pentru efectuarea experimentelor s-a utilizat un sistem SCR integrat în canalizația de evacuare a motorului ISUZU 4JB12. În figura 5.14a-c sunt date imagini ale fagurelui SCR înainte (a) și după finalizarea testelor (b-c).

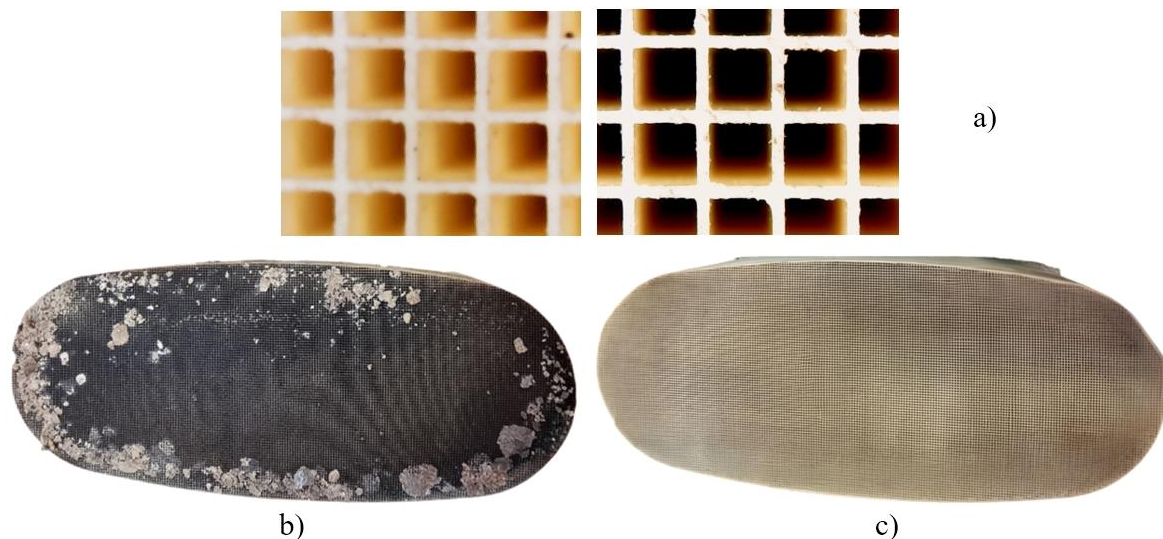


Fig. 5.14a-c. Fagurele SCR utilizat în cadrul experimentelor: a) nou, b) după exploatare, zonă admisie, c) după exploatare, zonă evacuare.

Pentru analiza în detaliu a fagurelui nou (caz a) s-a procedat la investigarea vizuală a acestuia folosind microscopul digital portabil cu mărimea de  $x1600$ . În figura 5.15 se da imaginea prin secțiunea longitudinală a unui microcanal aflată în faza incipientă a testelor.



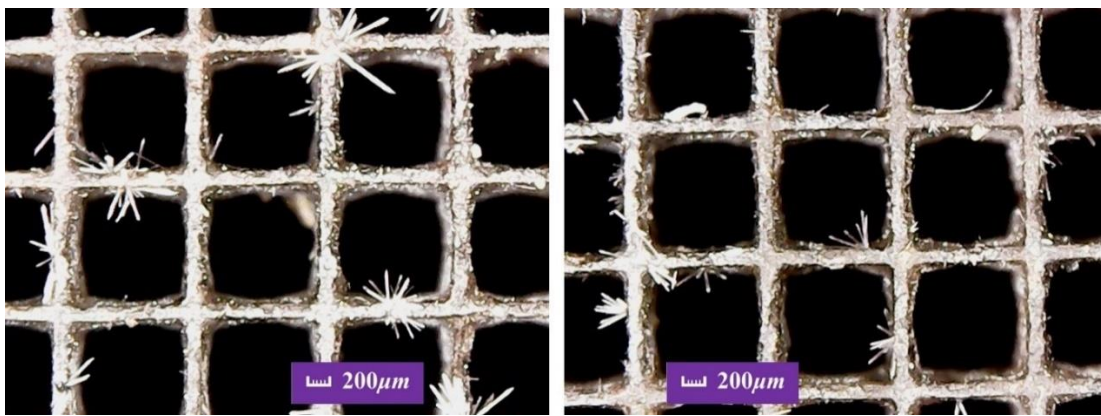
Fig. 5.15. Secțiune prin microcanalele fagurelui SCR, înainte experimentelor.

După efectuarea testelor motorului diesel echipat cu un sistem SCR s-a procedat la defaectarea și studierea catalizatorului. A fost vizualizată partea frontală a fagurelui constatându-se că zona de acumulare a depunerilor de AdBlue variază funcție de regiunea studiată.

*Cercetările experimentale dovedesc că variațiile morfologice din microcanațele fagurelui SCR (care apar la depunerea sărurilor de AdBlue) conduc la:*

- apariția incipientă a unor formațiuni aciculare pe muchiile frontale ale microcanațelor;
- dezvoltarea unor depuneri pe muchii, în colțul și în interiorul microcanațelor;
- creșterea depunerilor cu acoperirea parțială sau totală a microcanațelor;
- obturarea parțială sau totală a unor zone din fagurele SCR.

După cum se observă din figura 5.16, s-a descoperit în zona centrală a fagurelui pe partea frontală a microcanațelor depuneri de formă aciculară, similare cu cele din zona de injecție a soluției de AdBlue (fig. 5.9).

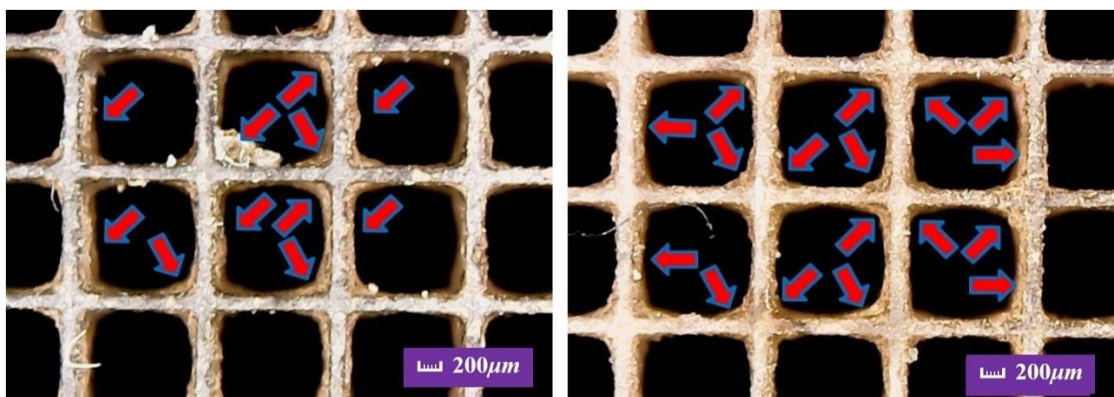


**Fig. 5.16. Faza incipientă de apariție a depunerilor aciculare la microcanațele fagurelui SCR.**

Figura 5.16 demonstrează fără echivoc că depunerile sărurilor pe microcanațele fagurelui SCR apar diferit de la un microcanal la altul, fenomen datorat cel mai probabil modificării temperaturii fluxului de gaze și variația ratei de formare a vaporilor.

*Fagurele catalizatorului SCR a fost inspectat periodic și s-a observat prin microscopie digitală, apariția la partea frontală a microcanațelor a unor noi depuneri aciculare incipiente, fapt care arată că formarea depunerilor are un caracter permanent.*

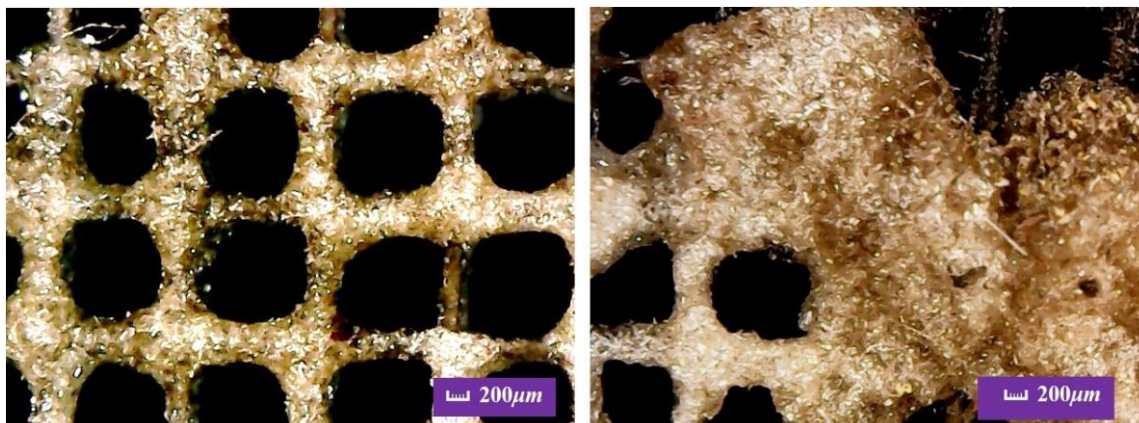
Figura 5.17 face dovada apariției și dezvoltării în timp a unor depuneri pe muchii, în colțul și în interiorul microcanațelor fagurelui SCR.



**Fig. 5.17. Analiza optică a depunerii sărurilor de AdBlue în interiorul microcanațelor.**

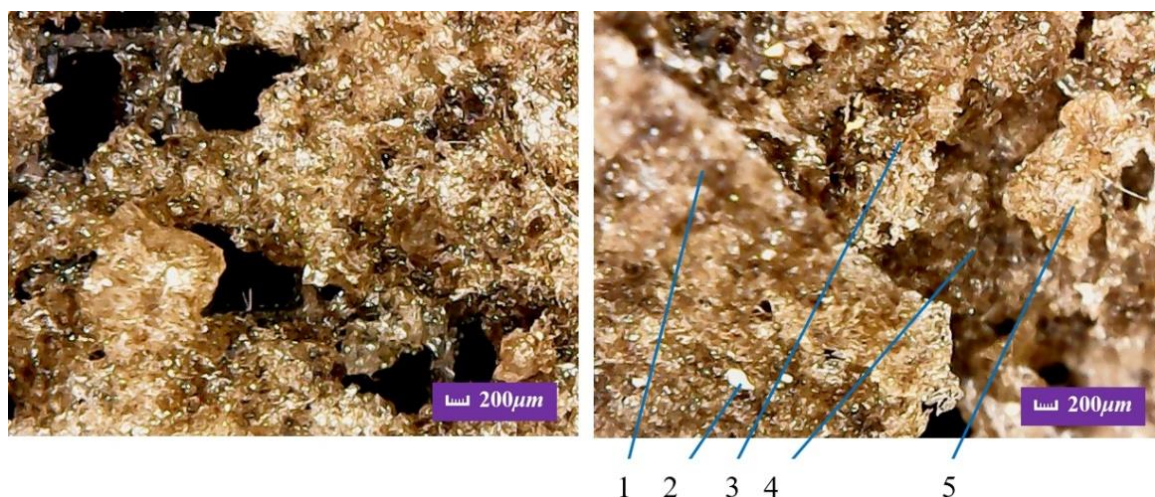


În figura 5.18 se observă că, odată cu trecerea timpului și creșterea temperaturii, apare o acumulare a reziduurilor produse care tind să blocheze parțial (stânga) sau total (dreapta) microcanalele catalizatorului SCR, fapt ce va duce la scăderea eficienței catalizatorului.



*Fig. 5.18. Creșterea depunerilor în microcanalele SCR și apariția fazei de îmbătrânire.*

Figura 5.19 arată, prin intermediul microscopiei digitale, cum evoluează procesul de acoperire totală a părții frontale a fagurelui catalizatorului.



*Fig. 5.19. Dovada experimentală a obturării fagurelui SCR în timp și evidențierea formării straturilor.*

Datorită temperaturilor ridicate ale gazelor de evacuare apare cu timpul o îmbătrânire a depunerilor, de culoarea galben-maronie, fapt care se poate demonstra experimental cu ușurință prin imaginile din figura 5.19. Dacă temperatura de funcționare este mai mică decât punctul de descompunere a bisulfatului de amoniu depus pentru o perioadă lungă de timp, activitatea catalizatorului va fi întreruptă prin obturarea totală a fagurelui, caz în care se va dezactiva temporar catalizatorul. Procesul de îmbătrânire poate deveni reversibil atunci când temperatura gazelor de evacuare crește întrucât bisulfatul de amoniu se descompune, iar activitatea catalizatorului este restabilită. Acest lucru poate fi dovedit experimental întrucât în figură (dreapta) se observă depunerea în plăcile 1, 3-5 a depozitelor de săruri și că se pot forma noi categorii de depuneri 2. Existența straturilor multiple arată că acestea apar și dispar periodic.

S-a considerat de interes să se cerceteze ce se întâmplă și în interiorul microcanalelor sistemului SCR, caz în care s-au practicat secționarea longitudinală a acestora.

În figura 5.20 se prezintă stadiul incipient al depunerilor în secțiuni longitudinale ale microcanalelor SCR și evoluția în timp a acestora.



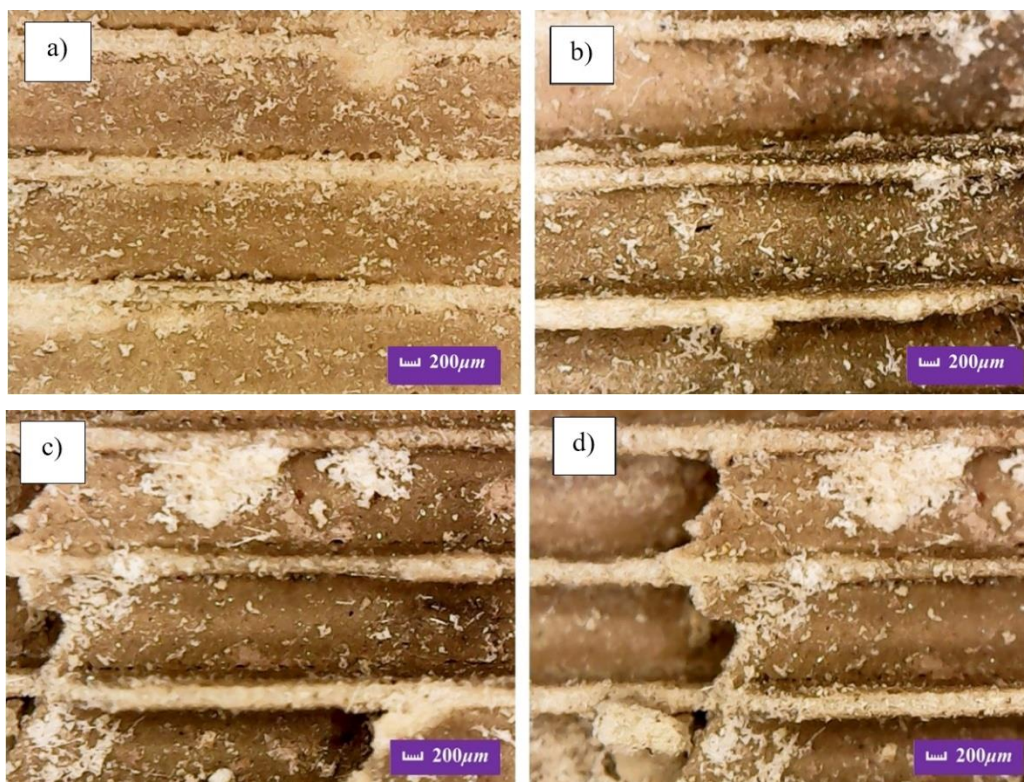


Fig. 5.20. Analiza optică a microcanelor fagurelui SCR în secțiune longitudinală.

Reziduurile obținute experimental arată că pot să apară depuneri incipiente ca în cazul precedent (frontal fagure) (a), reziduurile să se dezvolte cu trecerea timpului (b) și în caz catastrofal microcanalele să fie umplute parțial sau total (c-d).

## 5.6 Contribuții asupra metodelor de intensificare a procesului de atomizare a picăturilor de AdBlue

Metodele de intensificare a procesului de atomizare a picăturilor de AdBlue folosesc, cel mai adesea, undele ultrasonice, produse cu ajutorul concentratoarelor magnetostrictive sau celulelor piezoelectrice. Pentru o analiză detaliată a rezultatelor, s-au efectuat filmări rapide cu 240fps, cu ajutorul unui echipament produs de Fastec Imaging Corporation, modelul TSHRCS.

S-a propus ca, experimental, procesul de adăugare a soluției de AdBlue în traseul gazelor de evacuare, cu efectul intensificării procesului de atomizare, să se realizeze prin metodele:

- injecție normală cu un injector din dotarea SCR;
- injecție pe discul unui concentrator magnetostrictiv cu efect de atomizare a picăturilor de AdBlue - *contribuție autor*;
- absorbția picăturilor atomizate în niște celule piezoelectrice prin intermediul unui ejector - *contribuție autor*.

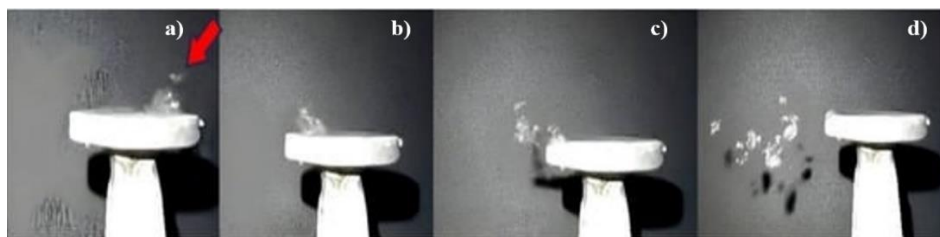
### 5.6.1 Utilizarea concentratoarelor magnetostrictive pentru atomizarea picăturilor de AdBlue

În &2.2 este prezentat în detaliu principiul de funcționare și modul de realizare a unui concentrator magnetostrictiv. Discul de aluminiu al concentratorului a fost supus unor unde ultrasonice și unui flux de căldură care a făcut ca acesta să atingă o temperatură maximă de 473K. Pentru creșterea și reglarea temperaturii s-a utilizat o turbosuflantă de aer cald. Prin experimentele de laborator s-au urmărit două aspecte. Unul a vizat evaluarea procesului de atomizare față de injecția normală, iar celălalt a studiat apariția efectului de calefacție a peliculei de AdBlue formată pe discul de aluminiu.

Pentru prima situație, s-au studiat proprietățile fizice și structura cristalelor de AdBlue în cazul prezenței sau nu a undelor ultrasonice. Cercetările în acest caz au ca scop înțelegerea procesului de cristalizare a soluției de AdBlue, în condițiile existenței unor unde ultrasonore controlate și oferă noi perspective în privința îmbunătățirii eficienței sistemelor SCR pentru autoturisme, camioane și nave maritime.

Experimentul a constat în lansarea succesivă a unor picături de AdBlue, dintr-un stalagmometru, printr-un tub capilar. Temperatură inițială a picăturilor este de  $298K$  iar masa acestora este de  $100mg$ . Picăturile curg inițial gravimetric spre suprafața discului de aluminiu care, în prealabil, a fost încălzit la temperatura stabilită și cad pe disc sub un unghi de  $60^\circ$  întrucât sunt antrenate de fluxul de aer cald al turbosuflantei. Încălzirea discului și a spațiului adiacent cu turbosuflanta creează un mediu favorabil pentru vaporizarea rapidă a picăturilor de AdBlue. Întrucât unul dintre obiectivele tezei de doctorat vizează studiul condițiilor în care apar depuneri de săruri la suprafețe, s-au utilizat tehnici care să permită vizualizarea acestora. În timpul experimentelor, au fost monitorizați și înregistrați o serie de parametri precum temperatura, masa și rata de evaporare.

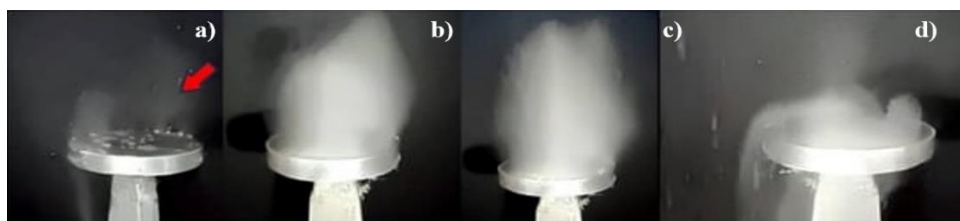
Figura 5.21 prezintă un extras de cadre din filmările cu o cameră de mare viteză a procesului ciocnirii unei picături care cade la  $60^\circ$  față de orizontală (în direcția săgeții roșii) cu un disc de aluminiu care are o temperatură ridicată.



*Fig. 5.21a-d. Evoluția unei picături de AdBlue la contactul cu un disc fără unde ultrasonore: a) impact, b) fragmentare primară, c) fragmentare secundară, d) dispersie jet.*

Analizând imaginile obținute se constată că în cazul fig. 5.21-a are loc impactul picăturii cu discul, apoi începe procesul de fragmentare primară 5.21-b și de fragmentare secundară 5.21-c iar, în final, fragmentele rezultate se dispersează 5.21-d. Discul de aluminiu nu este supus undelor ultrasonice, caz în care se poate observa fenomenul de "spargere" a picăturii, atunci când aceasta intră în contact cu suprafața încălzită. După contactul cu suprafața fierbinte pe de o parte și antrenarea fragmentelor în fluxul de gaz fierbinte începe și procesul izobar-izotermic de vaporizare.

O a doua categorie de experimente a utilizat discul de aluminiu atașat la un concentrator magnetostrictiv conectat la un generator de unde care furnizează  $20kHz$ . Pe lângă impactul mecanic cu o suprafață plană, picăturile de AdBlue sunt supuse unor unde ultrasonore produse de concentratorul magnetostrictiv. Urmare a impactului mecanic și vibrațiilor induse de undele ultrasonore în disc, se produce o fragmentare mult mai intensă care intensifică accentuat procesul de atomizare. Figura 5.22 arată efectul impactului și pe cel dat de undele ultrasonore asupra picăturilor de AdBlue. Acestea ating prin atomizare diametre între  $3-7\mu m$  (față de  $30-100\mu m$  la injecția normală).



*Fig. 5.22a-d. Procesul de atomizare a picăturilor de AdBlue prin efect magnetostrictiv la o frecvență de  $20kHz$ : a) impact, b) fragmentare primară, c) fragmentare secundară, d) dispersie jet.*

La contactul cu suprafața discului încălzit, conform figurii 5.22-a, o anumită parte a picăturii nu se vaporizează instantaneu, ci se sparge în picături relativ mici. Figurile 5.22b-c arată evoluția procesului de atomizare. În acest stadiu, undele ultrasonore contribuie la dispersarea picăturii în micro și chiar nano-picături care, spre deosebire de cazul anterior se ridică de la suprafața discului într-un vortex vertical și formează o ”ceață de picături atomizate”. Ulterior, conform figurii 5.23-d, are loc dispersia picăturilor în zona adiacentă discului. Fenomenul de intensificare a fragmentării picăturilor de AdBlue prin metoda utilizării unui concentrator magnetostriktiv conform încercărilor de laborator dă rezultate foarte bune și contribuie la facilitarea procesului de vaporizare, în amonte de catalizator SCR.

### 5.6.2 Studiul procesului de calefacție a picăturilor de AdBlue și utilizarea tehnicii IR pentru vizualizarea fenomenului

Tehnica filmării rapide a pus în evidență intensificarea fenomenului de atomizare în prezența unui câmp ultrasonor însă, asociat cu acest fenomen, este și calefacția. Mecanismul calefacției este total diferit întrucât ia în considerare și temperatura mediului încercat. În esență, după cum s-a arătat în &2.2, avem un proces de calefacție dacă, [CA24], are loc o ”vaporizare intensă la suprafața unui lichid aflat lângă un corp solid încins, care le împiedică contactul direct”. În cazul de față, sunt întrunite toate condițiile, întrucât picăturile injectate pe suprafață, formează o peliculă subțire de lichid la impact. Suprafața pe care se formează pelicula de lichid este încinsă de gazele de ardere. Ultrasunetele fac ca pelicula să se desprindă parțial de la suprafață, să se destrame și să se transforme în picături atomizate (în imediata vecinătate a suprafeței). Apare, deci, o desprindere a peliculei de lichid în micro-picături și un transfer de căldură datorat gazelor fierbinți. Vibrațiile induse de generatorul magnetostriktiv intensifică procesul de dispersie și fărâmițare a picăturilor. Experimental, s-a utilizat o tehnică de conversie a imaginilor în infraroșu (IR Thermal Imaging Cam) folosind echipamentul Samsung SM-G998B/DS pentru a evidenția diferențele survenite în două cazuri: cu și fără ultrasunete. Rezultatele obținute în figura 5.23 arată cum decurge impactul picăturilor cu discul de aluminiu fără utilizarea undelor ultrasonice.

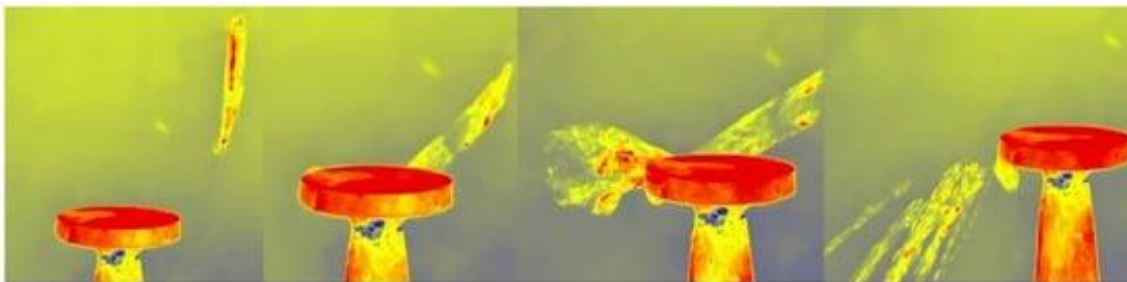


Fig. 5.23. Evidențierea calefacției picăturilor de AdBlue fără ultrasunete.

Această tehnică permite vizualizarea termică a procesului, fapt ce contribuie la distingerea gradului de vaporizare și a modului în care se dezvoltă procesul de vaporizare.

În figura 5.24 studiem același fenomen în prezența undelor ultrasonice de 20kHz.



Fig. 5.24. Evoluția vaporilor picăturilor de AdBlue în prezența calefacției generate de ultrasunete de 20kHz.



Figurile de mai sus pun în evidență evoluția temperaturii și vizualizarea fragmentării picăturilor de AdBlue cu intensificarea procesului de vaporizare, demonstrându-se astfel că utilizarea unui concentrator magnetostrictiv crește eficiența catalizatorului SCR.

### 5.6.3 Evidențierea experimentală a rolului undelor ultrasonice asupra depunerilor de cristale la o suprafață în cazul fenomenului de calefacție

Reziduurile care rezultă din descompunerea termică a soluției apoase de AdBlue pot avea un impact negativ asupra funcționării eficiente a SRC. Apariția de săruri, prin procesul de calefacție, poate conduce la obturarea unei părți a microcanalelor SCR, împiedicând în același timp fluxul de gaze de ardere prin fagure. Depunerile pot favoriza creșterea emisiilor de NOx.

*Cercetările experimentale doresc să scoată în evidență faptul că utilizarea undelor ultrasonice au un impact pozitiv asupra funcționării sistemului SCR al motoarelor diesel întrucât utilizarea acestei practici conduce la reducerea semnificativă a depunerilor de săruri de AdBlue pe suprafețele fierbinți.*

Studiul vaporizării picăturilor de AdBlue a evidențiat experimental formarea de reziduuri în cantități diferite pentru probele din cele două cazuri: fără și cu utilizarea undelor ultrasonice.

Figura 5.25-a corespunde depunerii sărurilor de AdBlue fără utilizarea undelor sonice iar figura 5.25-b arată efectul utilizării undelor ultrasonice asupra depunerilor. Imaginile color au fost obținute cu o cameră IR cod FLIR TG165, iar celelalte cu o cameră fotografică normală.

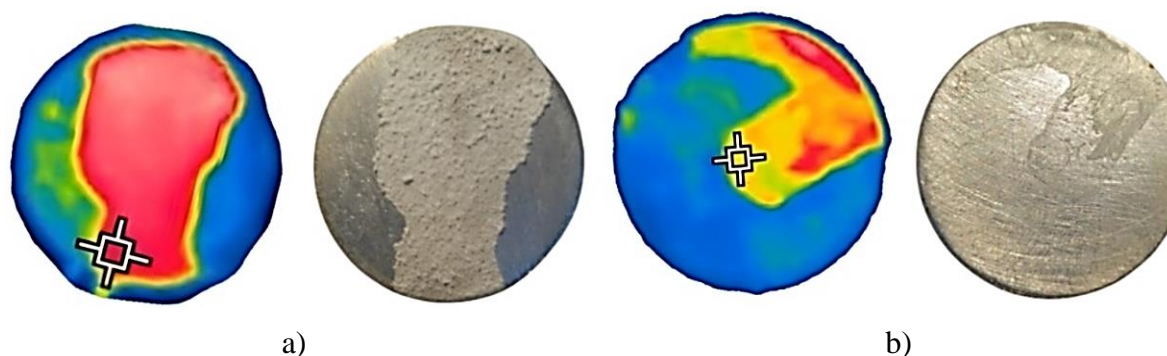


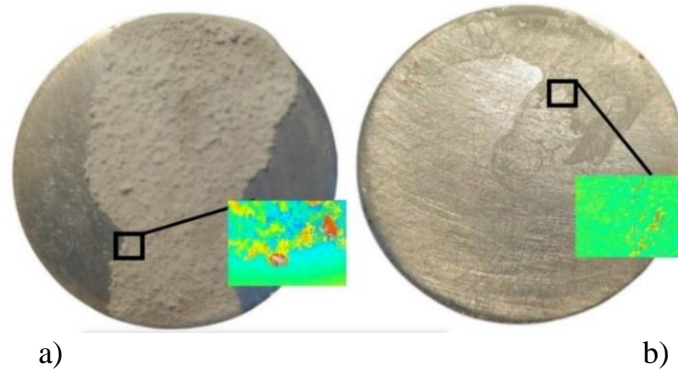
Fig. 5.25a-b. Reziduurile apărute pe un disc la calefacție: a) fără ultrasunete, b) cu ultrasunete.

Conform figurii 5.25-a, în cazul lipsei undelor ultrasonice, fenomenul de vaporizare conduce la formarea mai multor depuneri de uree solidă. Acest lucru poate fi pus pe seama creșterii temperaturii discului (zona roșie). Pelicula subțire de lichid tinde să se deplaseze spre zona marcată cu galben în timpul vaporizării. În plus, după cum reiese din figura 5.25-b, experimentele au arătat că rata de depunere în cazul utilizării vibrațiilor induse de undele ultrasonice a fost mult mai mică decât în cazul probelor care nu au fost influențate de vibrații.

Pentru a evalua cantitativ și calitativ depunerile reziduurilor pe proba de aluminiu la injecția de AdBlue într-un mediu ultrasonic sau în lipsa acestuia, s-au efectuat măsurători ale microtopografiei suprafeței cu ajutorul unui microscop confocal MarSurf CWM 100 cu interferometru cu lumină albă, produs de Mahr GmbH, Gottingen, Germania.

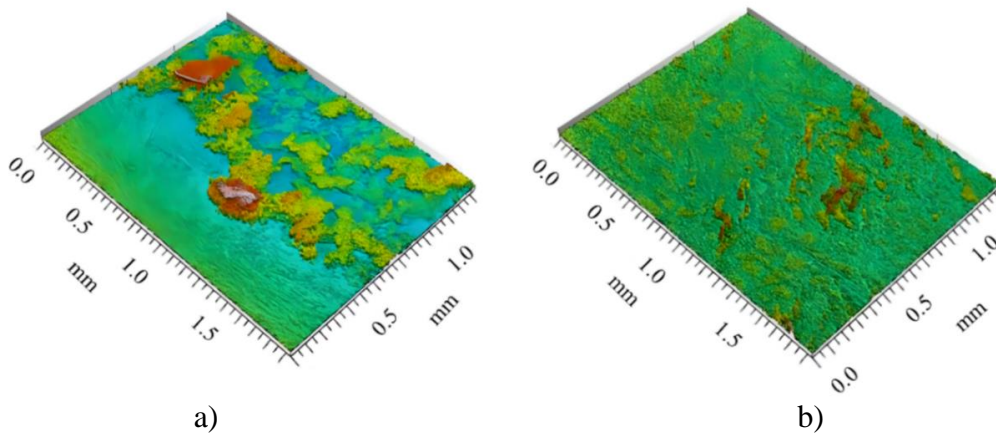
Măsurătorile microtopografiei suprafeței s-au realizat în zone de  $2 \times 1,5 \text{ mm}^2$ , luând în considerare atât direcția longitudinală, cât și cea transversală. Pentru a determina depunerea de cristale pe suprafețele celor două probe (cu sau fără unde ultrasonice), s-au efectuat analize cantitative în puncte de interes marcate pe fiecare probă, conform figurii 5.26a-b. Zonele de interes, ilustrate în figura 5.26a-b, au fost identificate pe baza nivelului de rugozitate și al distribuției depunerilor, cu scopul de a obține o evaluare cât mai precisă a dimensiunilor și a modului de aderare la suprafețe.





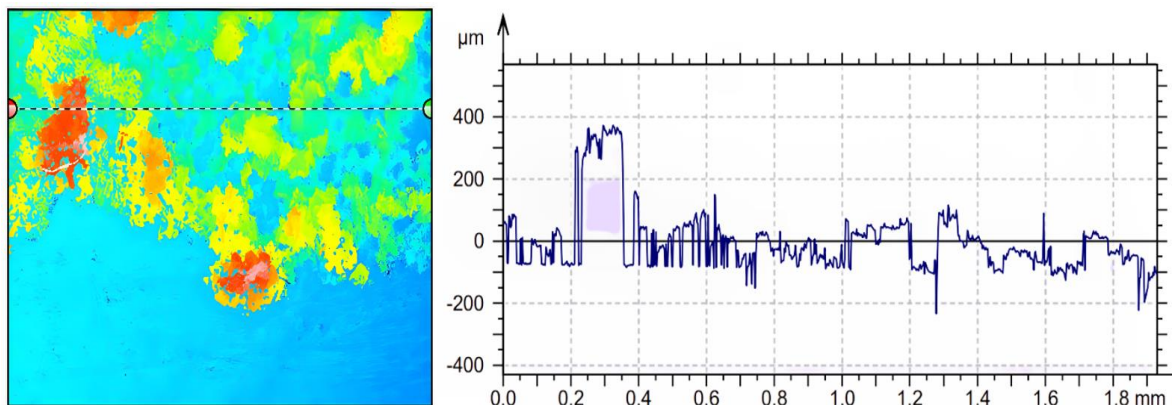
**Fig. 5.26a-b. Zonele investigate la depunerea reziduurilor de AdBlue: a) fără ultrasunete, b) cu ultrasunete.**

În figura 5.27a-b sunt date rezultatele obținute cu microscopul confocal MarSurf CWM 100 care a permis examinarea profilului reziduurilor pentru cele două probe investigate.



**Fig. 5.27a-b. Profilurile 3D ale depunerilor de uree în AdBlue obținute cu Mahr CWM 100: a) fără ultrasunete, b) calefacție cu ultrasunete.**

Echipamentul utilizat permite emiterea unor rapoarte de măsurare, din care se poate observa, conform figurii 5.28, că apar diferențe semnificative între cele două cazuri în ceea ce privește înălțimea profilului de depunere. Datele experimentale din figură arată o acumulare semnificativă de reziduuri solide, cu înălțimi de maxim  $375\mu\text{m}$ , în situația în care nu sunt prezente undele ultrasonore.



**Fig. 5.28. Profilul depunerilor de AdBlue la proba fără unde ultrasonore.**

Pentru cazul în care se utilizează ultrasunete și apare procesul de calefacție, analiza profilului din figura 5.29 arată că avem o distribuție constantă a vârfurilor de asperitate la suprafață.

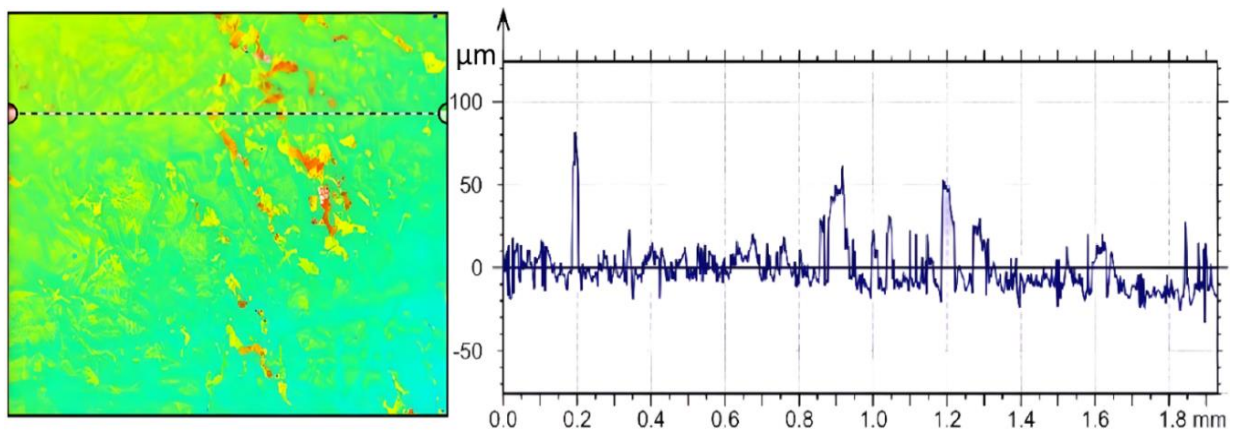


Fig. 5.29. Profilul de depunere a ureei AdBlue la calefacție în testul cu unde ultrasonore.

O analiză comparativă a datelor obținute în figurile 5.28 și 5.29 arată că în cazul în care nu s-au utilizat ultrasunete, înălțimea profilului de depunere este mult mai mare (în medie  $Rz=150,2\mu m$ ) decât în cazul în care acestea s-au utilizat ( $Rz=4,57\mu m$ ). Determinările experimentale certifică faptul că întrebuințarea ultrasunetelor are un efect pozitiv în reducerea cantității depunerilor, contribuind astfel la eliminarea parțială sau totală a cristalelor formate prin calefacție. Depunerile sărurilor de AdBlue în lipsa ultrasunetelor prezintă câmpuri de concentrații diferite funcție de zona analizată, spre deosebire de cazul utilizării acestora. Distribuția particulelor solide reziduale nu acoperă întreaga suprafață studiată în aceeași măsură, precum în cazul utilizării undelor ultrasonore. S-a constatat experimental că se disting grupuri mici de cristale concentrate în anumite zone ale suprafeței, unde se pot observa diferențe de până la  $50\mu m$ . Acestea reprezintă o variație semnificativă a înălțimilor în zonele respective și pot avea un impact considerabil asupra depunerilor rămase. Cu ajutorul microscopiei confocale, a fost posibilă determinarea parametrilor de rugozitate pentru profilele Ra și Rz (figura 5.30).

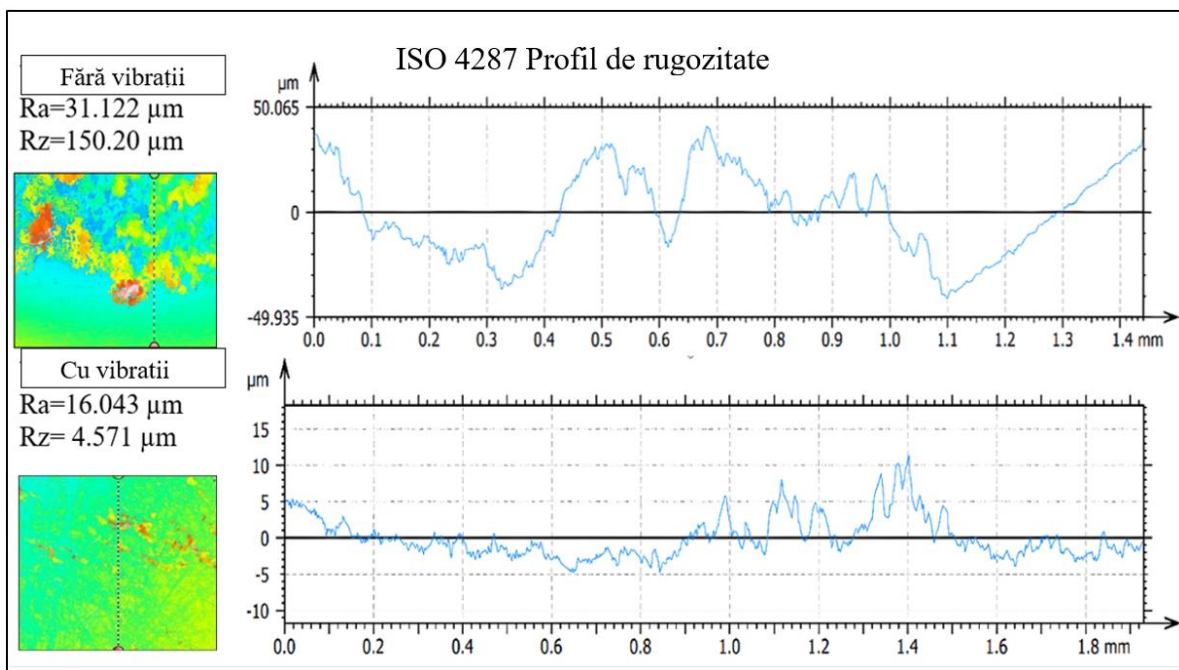


Fig. 5.30. Profilele de rugozitate Ra și Rz ale reziduurilor de AdBlue, rezultate prin calefacție.

Parametrii obținuți în figura 5.30 sunt esențiali în evaluarea proprietăților rugozității suprafeței. Pentru profilul analizat, s-a obținut o valoare medie a Ra de  $16,043\mu m$ , pentru cazul

în care au existat unde ultrasonore, respectiv  $31,122\mu\text{m}$ , pentru proba care nu a fost supusă undelor ultrasonore. Valorile mai mici ale Ra indică o calitate mai bună a suprafeței, cu rugozitate redusă și o textură mai uniformă.

## 5.7 Contribuții aduse la analiza termică a zonei catalizatorului SCR

În timpul pornirii la rece, controlul emisiilor de NO<sub>x</sub> la sistemele SCR reprezintă cea mai mare provocare, întrucât, în această etapă de funcționare, se produce o cantitate semnificativă a acestora. Pentru a respecta standardele de emisii, se impune reducerea timpului de activare a SCR, realizat cel mai adesea prin introducerea unor sisteme de preîncălzire a gazelor de evacuare. În vederea studierii emisiilor de NO<sub>x</sub> în timpul pornirii la rece a motorului, s-au făcut testări experimente pe un motor diesel ISUZU 4JB1, cu sau fără sarcină, care au urmărit atât monitorizarea temperaturii cât și noxele din sistemul de evacuare a motorului diesel. Scopul testelor a fost de a determina cu exactitate câmpul de temperatură în anumite zone ale tubulaturii de evacuare, în zona de injecție și în cea a fagurelui SCR. O importanță considerabilă trebuie acordată înțelegerii modului în care temperatura din interiorul conductei de evacuare influențează procesul de transformare a NO<sub>x</sub> în SCR. Se au în vedere pierderile excesive de căldură pe traseu sau la suprafața conductei, care pot afecta semnificativ acest proces.

### 5.7.1 Analiza în IR a temperaturii zonei de injecție a soluției de AdBlue și a catalizatorului SCR

Pentru determinarea temperaturii, s-a apelat la tehnici de imagistică termală folosind echipamente de cercetare profesionale de laborator cât și senzori de temperatură amplasați la intrările și ieșirile catalizatoarelor. În acest sens, s-a utilizat o cameră termică FLIR x6540sc pentru a măsura temperaturile din zonele de interes. Imaginile au fost efectuate pe cicluri de funcționare ale motorului diesel și ale sistemului de frânare, la turații cuprinse între 1350-2300r.p.m., pentru diferite sarcini 25, 50, 75 și 100%.

Figura 5.33 prezintă înregistrări termografice ale sistemului SCR, după 30s de la pornirea motorului diesel, pentru conducta de evacuare exterioară și catalizator, care include și zona de injecție a soluției de AdBlue.

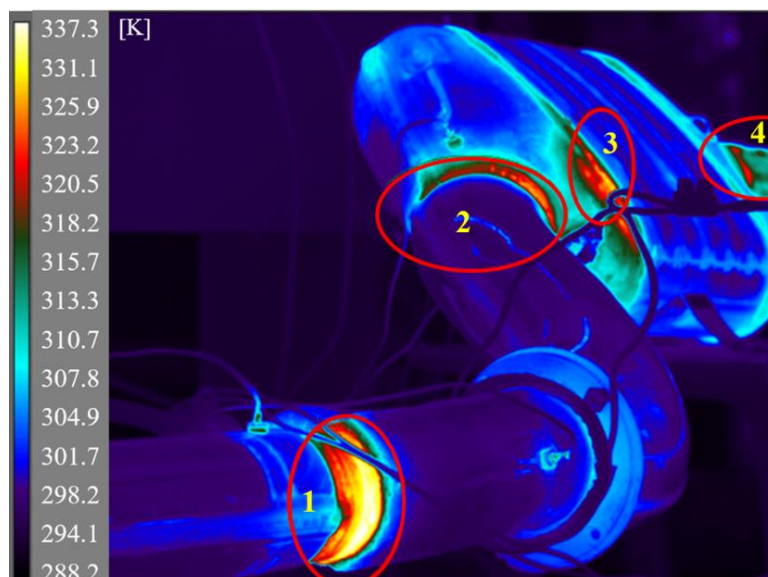
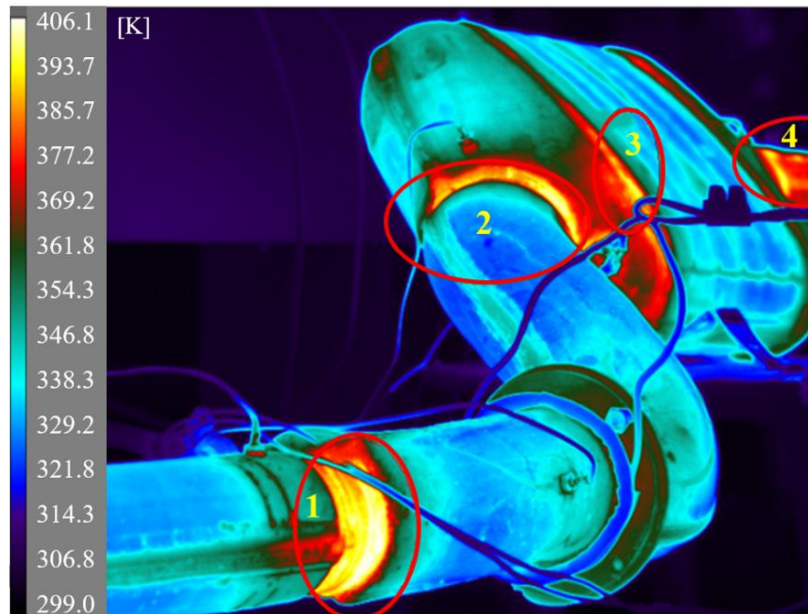


Fig. 5.33. Temperatura în zona injecției de AdBlue și a catalizatorului SCR, testare motor la rece.

Utilizând scara temperaturii din partea stângă a imaginii se poate determina temperatura pentru orice punct al sistemului SCR. Din analiza grafică, se observă că în zonele unde conducta de evacuare se îmbină, există o creștere pronunțată a temperaturii, apropiată de 337K. Experimental, au fost efectuate mai multe determinări pe parcursul unui ciclu complet de testări,



pentru a se studia viteza de creștere a temperaturii, zonele de încălzire a tubulaturii și valoarea temperaturii în orice zonă studiată. În figura 5.34 se prezintă imaginea termografică pentru cea mai ridicată valoare a temperaturii gazelor de evacuare, după 100s, pentru un ciclu de testare a motorului la rece.

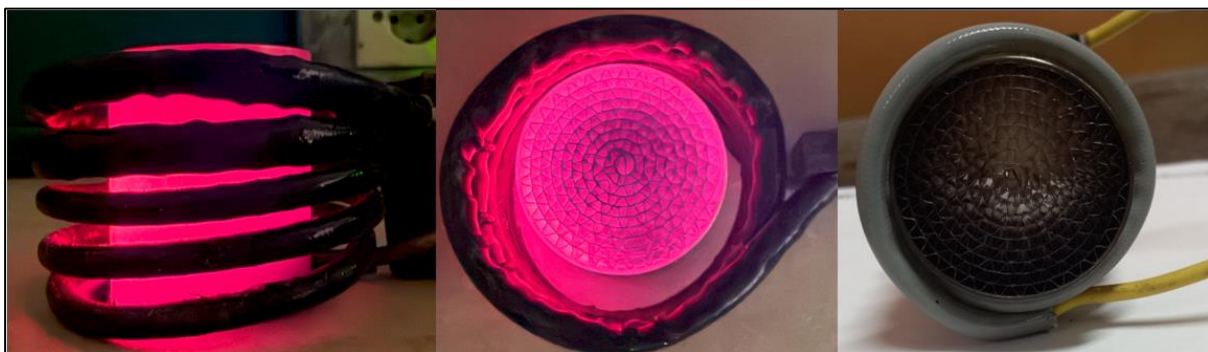


*Fig. 5.34. Temperatura în zona injectiei AdBlue și a catalizatorului SCR, testare motor după 100s.*

Din imaginea IR obținută se observă că temperatura maximă atinge 406,1K și că apar scăderi ale temperaturii în alte zone cum ar fi cea de injecție unde se atinge 339K.

### 5.7.2 Contribuții aduse la implementarea unui sistem de preîncălzire a gazelor de evacuare amplasat în zona ejectorului

Pentru compensarea fenomenului nedorit de funcționare a catalizatorului SCR la temperaturi prea scăzute, se utilizează diverse metode de preîncălzire a gazelor de ardere. Se propune utilizarea unei metode inductive de preîncălzire a unui fagure metalic amplasat pe traseul de curgere a gazelor de evacuare, așa cum s-a prezentat în &4.7. O imagine a sistemului de preîncălzire realizat este dată în figura 5.36.

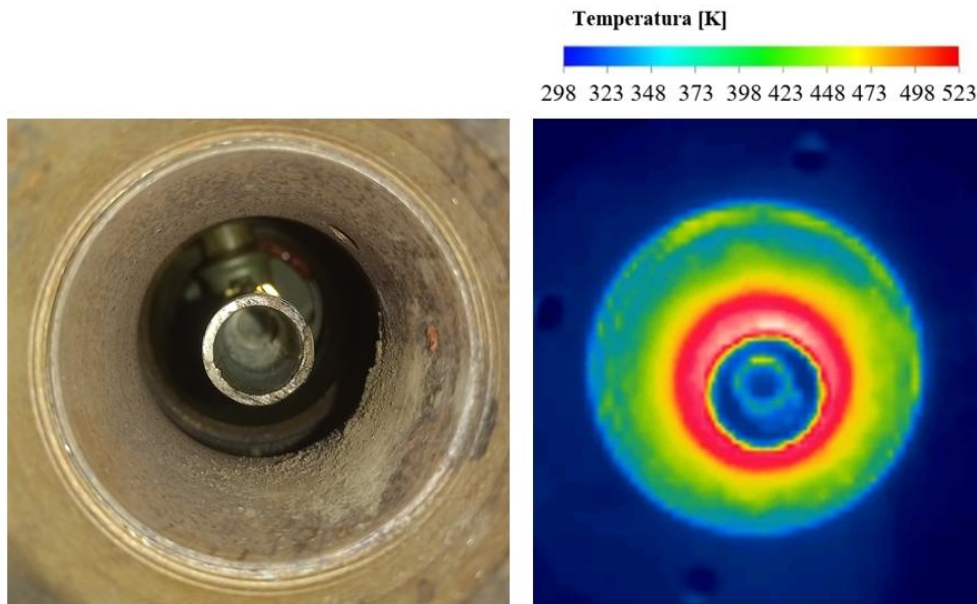


*Fig. 5.36. Sistem de preîncălzire inductivă a gazelor de ardere realizat.*

Figura 5.36 ilustrează încălzirea prin inducție a fagurelui metalic. Acesta va fi amplasat în interiorul sistemului de evacuare, în amonte de catalizator SCR și în drumul gazelor de evacuare.

În figura 5.37 sunt date imagini ale aceluiași sistem preluate cu camera în IR pentru evidențierea efectului preîncălzirii în zona sistemului de ejecție.

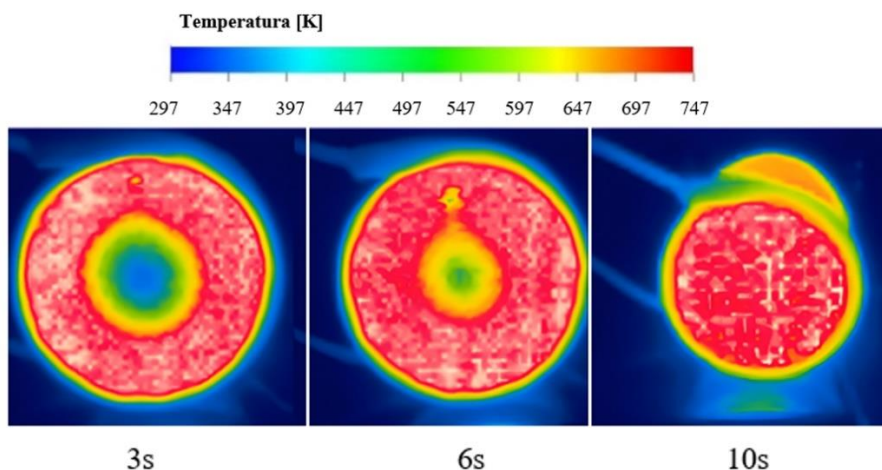




*Fig. 5.37. Distribuția temperaturii în proximitatea duzei ejectorului.*

Imaginea din stânga figurii 5.37 arată duza ejectorului iar cea din dreapta relevă modificarea temperaturii în zona de preîncălzire și contact cu vaporii. Preîncălzirea va avea ca efect modificarea performanței sistemului SCR, prin faptul că favorizează procesul de vaporizare și ajută la descompunerea mai eficientă a vaporilor de AdBlue în catalizatorul SCR. Este cunoscut faptul că, debitul de vapori care străbate catalizatorul SCR este în strânsă legătură cu reducerea emisiilor de oxizi de azot din gazele de evacuare ale motorului diesel. De asemenea, prin preîncălzire se pot înlătura dificultățile legate de condensarea sau cristalizarea soluției de AdBlue în cazul funcționării motorului la rece.

Prin metoda propusă, în zona ejectorului este montat un fagure metallic care este încălzit inductiv. Gazele de evacuare pătrund prin acesta și ajung rapid la o temperatură optimă pentru creșterea eficienței conversiei chimice a NOx. Figura 5.38 prezintă evoluția câmpului de temperatură în timp, după încălzirea timp de 3s, 6s, 10s a catalizatorului, de la momentul acționării contactului motorului.



*Fig. 5.3832. Evoluția temperaturii catalizatorului în timp la preîncălzirea gazelor de evacuare.*

Figura 5.39 evidențiază, prin termoviziune, modul de preîncălzire a ejectorului. În figură s-a notat cu 1 fagurele SCR, cu 2 unitatea de preîncălzire, iar cu 3 zona de ejecție preîncălzită.

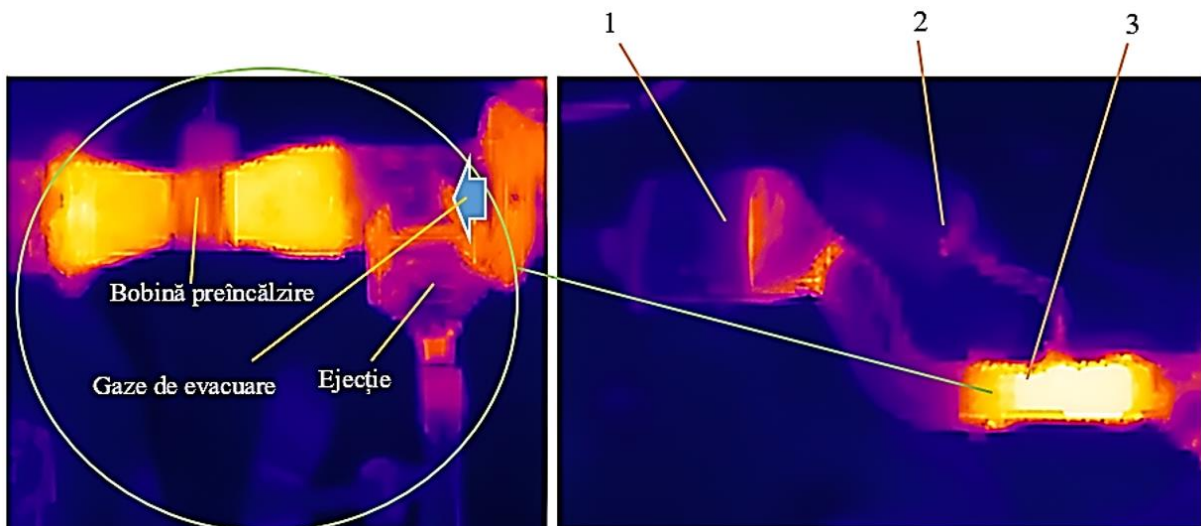


Fig. 5.39. Zonele de preîncălzire ale ejectorului obținute prin termografie în IR.

În figura 5.39 gazele de evacuare ale motorului diesel se deplasează de la dreapta spre stânga conform săgeții. Camera cu termoviziune pune în evidență eficacitatea sistemului de preîncălzire, evidențiind prin culoarea galben temperaturi mult mai ridicate în zona ejectorului în care este amplasată bobina de inducție.

### 5.7.3 Contribuții aduse la aplicarea sistemului inductiv de preîncălzire pe tubulatura de evacuare

După cum sa-a arătat, pot fi utilizate diferite metode de preîncălzire, una dintre acestea constând în amplasarea sistemului inductiv de preîncălzire pe tubulatura de evacuare. Determinările experimentale, folosind un sistem de preîncălzire pentru cazul pornirii la rece au constat în determinarea noxelor și, implicit, a nivelului de emisii de oxizi de azot (NO<sub>x</sub>). În figura 5.40a-b este ilustrat modul în care a fost montat sistemul de preîncălzire (a) și imagini obținute cu o cameră cu termoviziune, (b).

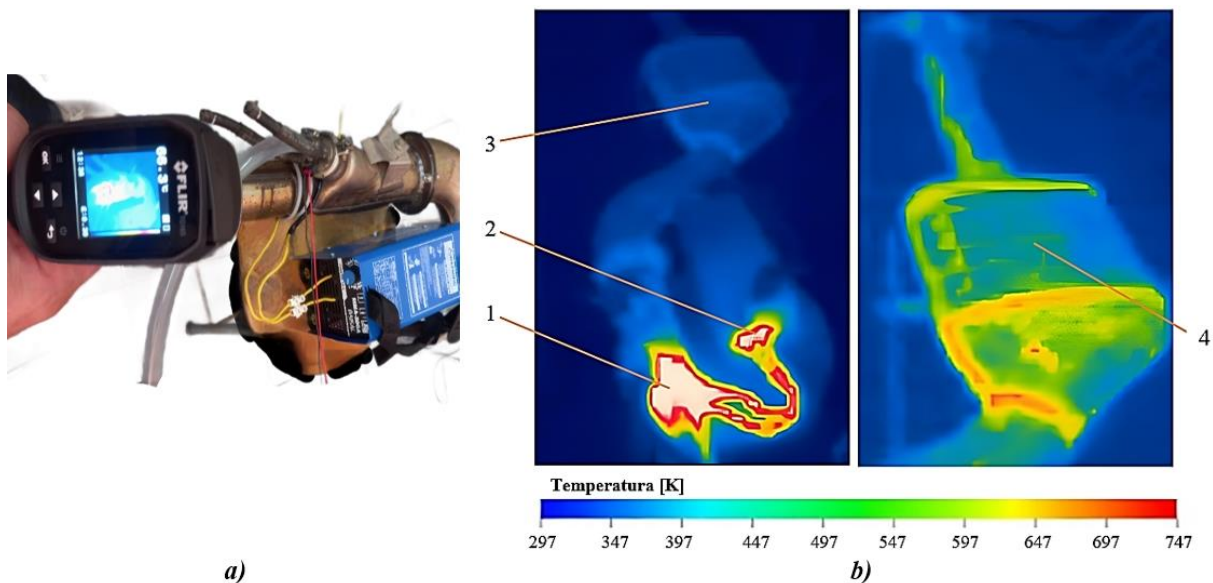


Fig. 5.40 a-b. Sistemul SCR cu preîncălzire inductivă în amonte de SCR: a) montaj, b) rezultate în IR.

Notațiile din figura 5.40-b reprezintă: 1 - bobină inductivă, 2 - generator de frecvență, 3 și 4 - SCR.

Determinările experimentale au arătat că încălzirea are loc în doar câteva secunde de la pornirea motorului, fapt esențial pentru creșterea temperaturii gazelor de evacuare și a eficacității sistemului SCR. Analizând distribuția temperaturii din figura 5.40-b, se observă că se ating valori ale temperaturii de până la 747K. Este important de menționat că, în sistemul de preîncălzire inductiv, temperatura măsurată a atins 1000K. În partea dreaptă a figurii 5.40-b este dată distribuția temperaturii în SCR după un minut de funcționare a sistemului cu preîncălzire inductivă, în condițiile în care și motorul diesel funcționa. Se observă că valorile temperaturii sunt mai ridicate, atingându-se 483K la intrarea în zona de început a fagurelui catalizatorului SCR și în cotul orientat la 30° față de tubulatura principală.

#### 5.7.4 Evoluția temperaturii gazelor de evacuare pe fiecare tronson al sistemului SCR

Pentru a studia temperatura pe fiecare tronson al sistemului SCR, a fost amplasat câte un termocuplu la fiecare intrare și ieșire a catalizatoarelor din dotarea acestuia. Achiziția de date a fost efectuată cu ajutorul unui cod și a unei plăci *ArduinoUno* (figura 4.14) de la senzorii de temperatură amplasați ca în figura 4.15. Datele experimentale s-au achiziționat pe un calculator și, ulterior, au fost generate grafice cu variația temperaturii echipamentelor SCR ale motorului diesel. Determinările experimentale au fost efectuate pentru o serie de turații și sarcini prestabilite. Experimentele, au avut ca scop să demonstreze eficiența diferitelor sisteme implementate, precum sistemul de eiecție sau cel de preîncălzire a gazelor de evacuare.

Determinările experimentale s-au efectuat într-o primă fază cu modificarea turației la sarcină nulă. A doua fază a constat în modificarea turației motorului diesel și a sarcinii acestuia prin intermediul frânei dinamometrice. O a treia fază este marcată de introducerea sistemului de preîncălzire. Toate cele trei faze amintite au fost efectuate în aceleași condiții de testare ale mediului ambiant (cu ajutorul unei instalații de condiționare a aerului din laborator), întrucât valorile temperaturii DOC + DPF + eiecție + SCR au o mare influență asupra performanței sistemului SCR.

Figura 5.42 reprezintă variația temperaturii în timp, pentru ciclul de pornire la rece, fără sarcină, a motorului diesel ISUZU 4JB1 la diferite praguri de turații. Atunci când motorul funcționează la rece, sistemul SCR este în stare incipientă de funcționare, iar temperatura internă este apropiată de 393K.

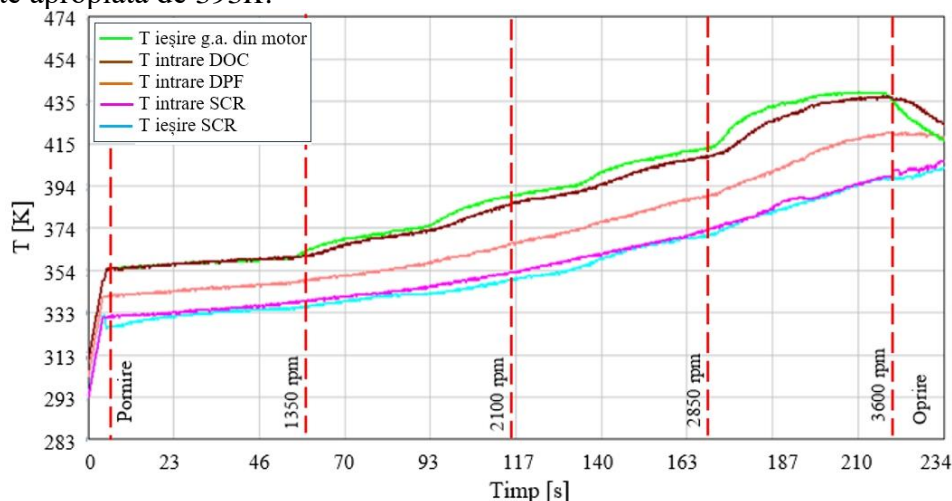


Fig. 5.42. Variația temperaturii sistemului de evacuare cu SCR, la diferite turații, fără sarcină.

Pe măsură ce turația crește, motorul se încălzește fapt care conduce la o creștere a temperaturii gazelor evacuate, ceea ce face ca sistemul de conversie a NOx să se încălzească continuu. Conform măsurătorilor efectuate, temperatura catalizatorului de conversie a NOx



ajunge la 435K în 187s. Ulterior, temperatura catalizatorului de conversie a NOx se menține la 435÷441K și apoi tinde spre intervalul optim de temperatură în vederea activării acestuia.

Un alt set de testări, conform planului de experimente, s-a efectuat pentru aceleași praguri de turații, la un ciclu de pornire la rece, însă în condițiile modificării sarcinii. Sarcina notată cu  $\chi$ , poate fi reglată pe stand cu ajutorul unui potențiomtru 8 după activarea acesteia cu butonul 7 (figura 4.21). S-a utilizat metoda ejecției pentru conversia NOx, debitul de vapori fiind reglat prin mărirea treptată a frecvenței de dozare, ceea ce conduce la creșterea ratei debitului masic de AdBlue odată cu creșterea turației. Figura 5.43 prezintă variația temperaturii SCR în timp, cu turația și sarcina, pentru testarea la rece a motorului diesel.

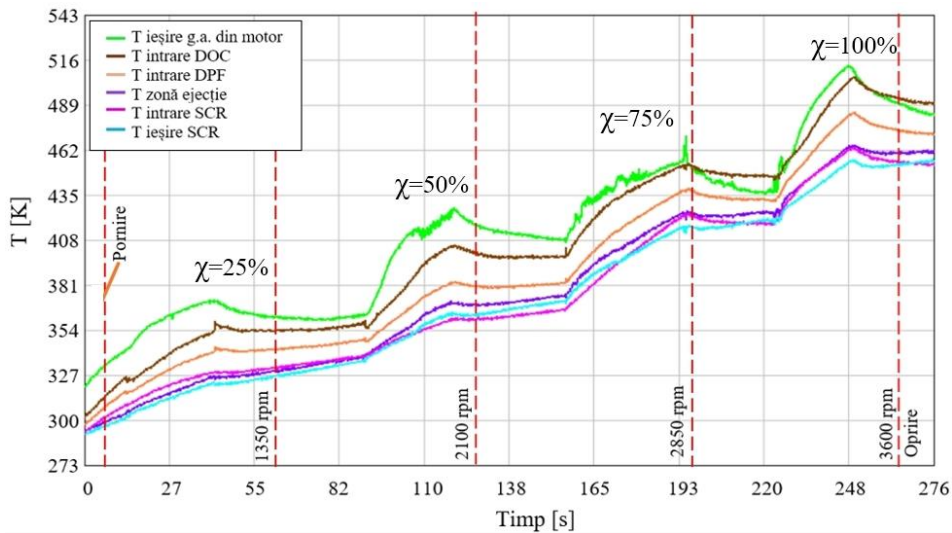


Fig. 5.43. Variația temperaturii sistemului de evacuare cu SCR, la diferite turații modificând sarcina  $\chi$ .

Pentru intervalele de turație alese, s-a determinat experimental că debitul masic de AdBlue absorbit prin ejecție variază între 3÷44mg/s. Se constată că după 190s temperatura crește în SCR, la 462K, temperatură la care fagurele SCR se activează și are loc conversia chimică. Temperatura maximă a gazelor la ieșirea din motor este atinsă după 248s și atinge o valoare de 512K, fapt ce indică o creștere semnificativă a temperaturii față de cazul precedent.

Utilizând sistemul de preîncălzire, s-a efectuat același ciclu de testare a motorului la rece și a fost folosit același sistem de ejecție a soluției de AdBlue ca în cazul precedent. Se constată, din figura 5.44, că apare o creștere semnificativă a temperaturii (515K) în zona fagurelui SCR.

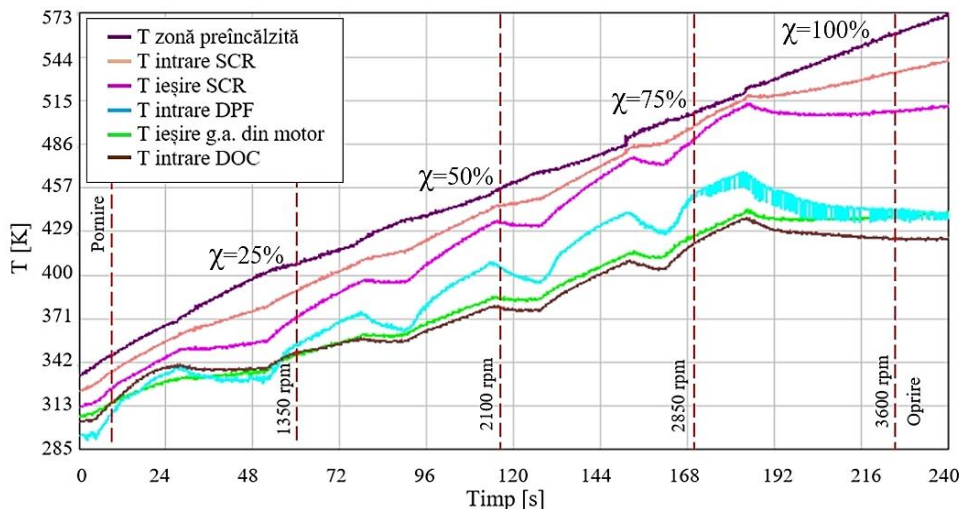


Fig. 5.44. Variația temperaturii sistemului de evacuare cu SCR, la diferite turații, sarcina 100% utilizând preîncălzirea gazelor.



Temperatura la ieșirea din SCR atinge 455K după 130s, ceea ce denotă o tendință de creștere a conversiei de NOx la sistemul cu preîncălzire a gazelor de evacuare amplasat înaintea SCR. Temperatura maximă după 187s este de 515K, fiind identificată astfel o creștere față de cazul precedent de 32,9%. Prin urmare, se constată că un sistem de preîncălzire crește drastic valorile temperaturii în SCR, fapt ce asigură mărirea eficienței acestui sistem. Chiar dacă valoarea maximă a temperaturii din grafic este de 573K există o tendință crescătoare a temperaturii de preîncălzire.

### 5.7.5 Analiza comparativă a emisiilor NOx la motorul diesel ISUZU 4JB1

Graficele din figura 5.70 reprezintă valorile comparative ale NOx obținute în timpul testelor pentru cinci configurații realizate: motor diesel fără SCR, motor diesel echipat cu SCR și injecție de AdBlue, cu și fără preîncălzire, SCR cu ejecție AdBlue din celule piezoelectrice, cu și fără preîncălzire.

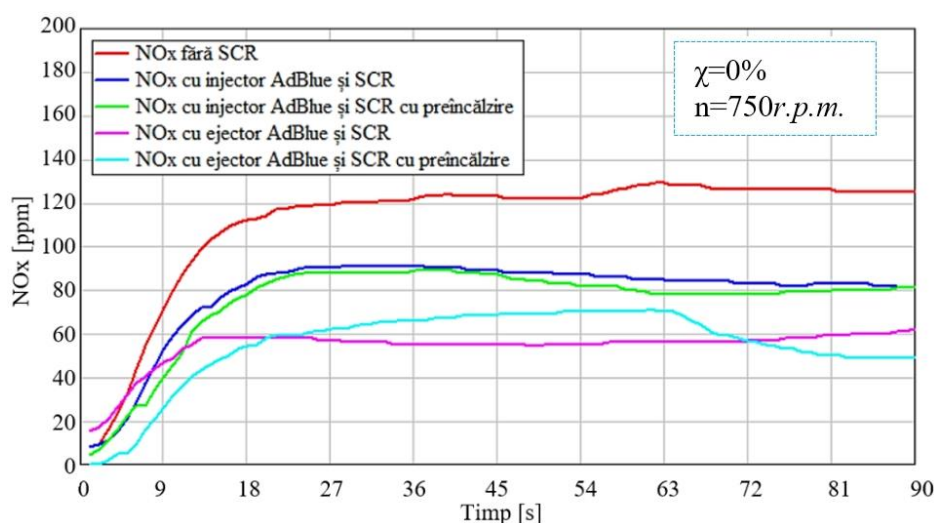


Fig. 5.70. Emisiile NOx comparative pentru motorul diesel ISUZU 4JB1, fără sarcină la 750r.p.m.

Din figură se observă că cele mai mici valori ale NOx se stabilizează la 44ppm pentru ejector cu preîncălzire, urmate îndeaproape de cazul utilizării ejecției la 62ppm iar valorile maxime sunt atinse de sistemul fără SCR la 137ppm. Valorile medii de 82ppm corespund injecției de AdBlue iar 80ppm sunt pentru preîncălzire și injecție de AdBlue.

În figura 5.71 sunt prezentate comparativ rezultatele experimentale pentru o sarcină de 25% a motorului diesel ISUZU 4JB1 la turația de 1350r.p.m.

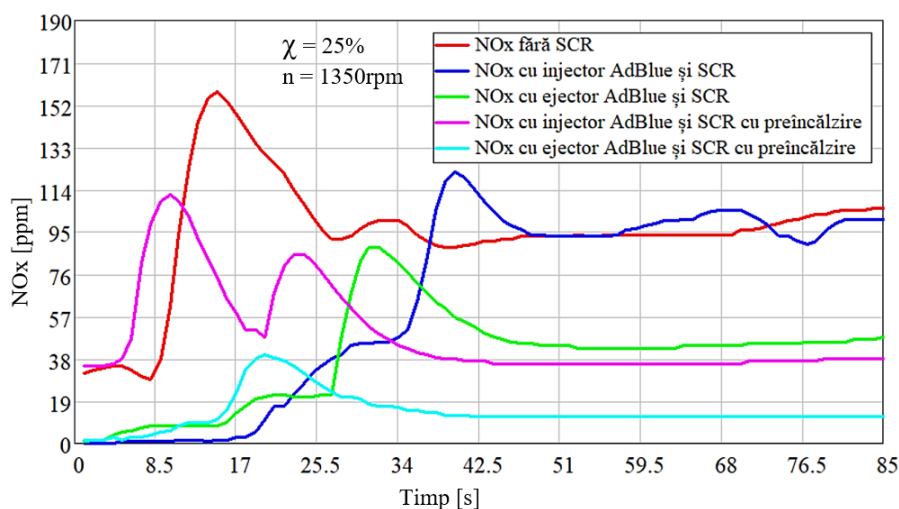


Fig. 5.7133. Emisiile NOx comparative pentru motorul diesel ISUZU 4JB1, sarcină 25% la 1350r.p.m.

Valorile maxime ale NOx sunt destul de apropiate la stabilizare pentru motorul fără SCR când se atinge 109ppm, față de 99ppm pentru dotare cu SCR și injecție de AdBlue. Cea mai mică valoare se obține în cazul ejecției când se estimează că vaporii de AdBlue, datorită distribuției lor uniforme în gazele de evacuare, ar absorbi o parte din cantitatea de NOx. Această ipoteză este posibilă, întrucât conversia chimică are loc la valori de peste 200°C.

Pentru o sarcină de 50% și o turație de 2100r.p.m. s-a obținut experimental figura 5.72 care arată că cele mai favorabile valori ale NOx de 41ppm sunt pentru cazul utilizării sistemului de ejecție a vaporilor din celulele piezoelectrice, concomitent cu preîncălzirea amestecului vaporiz-gaze de evacuare.

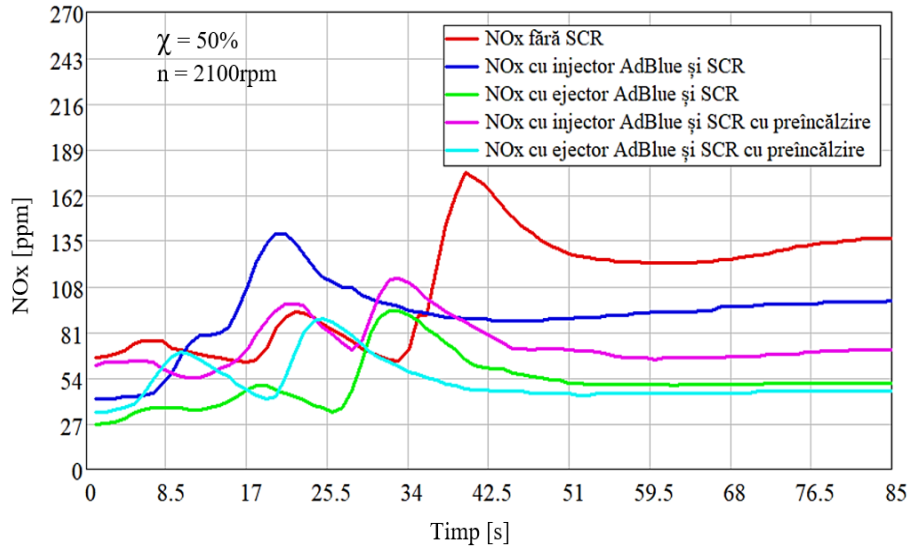


Fig. 5.72. Emisiile NOx comparative pentru motorul diesel ISUZU 4JB1, sarcină 50% la 2100r.p.m.

La injecția de AdBlue pentru motorul echipat cu SCR valorile NOx ating 99ppm față de 135ppm în cazul lipsei SCR. O dată introdus sistemul SCR se observă, destul de clar, eficiența acestuia în reducerea NOx, indiferent de metoda utilizată.

Datele comparative ale NOx obținute pentru o sarcină de 75% și o turație de 2850r.p.m. arată că nivelul acestora atinge cele mai scăzute valori tot pentru ejecția vaporilor din celulele piezoelectrice.

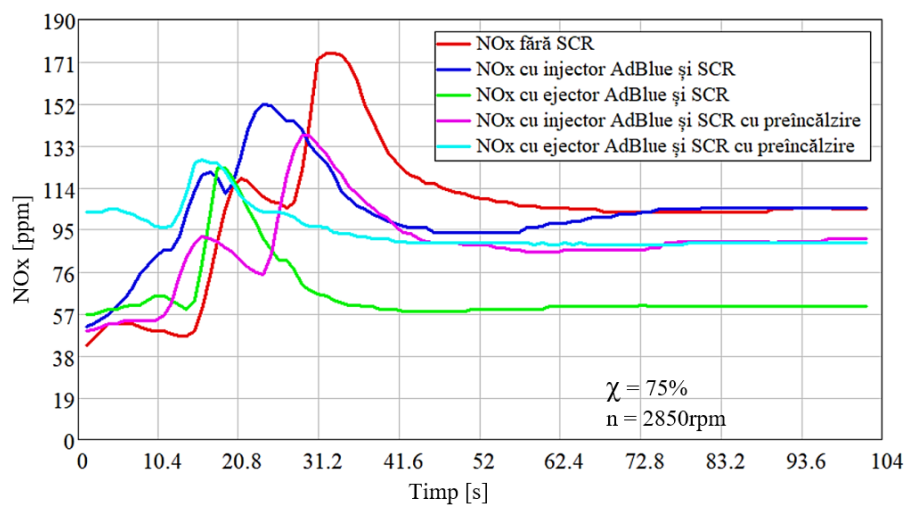


Fig. 5.73. Emisiile NOx comparative pentru motorul diesel ISUZU 4JB1, sarcină 75% la 2850r.p.m.

Deja, la o sarcină de 75% se observă tendința ca valorile NOx să se apropie de la un caz la altul, lucru ce poate fi pus pe seama nivelului temperaturilor tot mai ridicate din sistemul SCR.

În figura 5.74 sunt date rezultatele experimentale obținute pentru NOx la sarcină 100% și o turație de 2300r.p.m., când apare o grupare evidentă a valorilor stabilizate ale NOx.

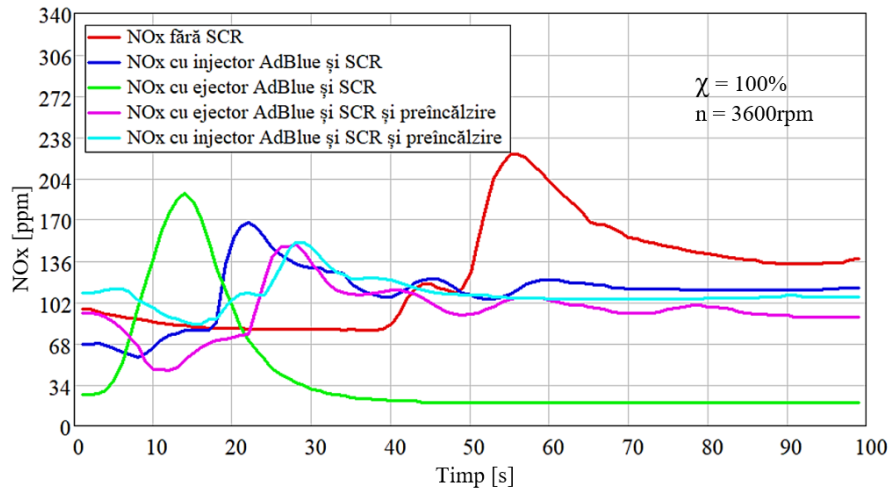


Fig. 5.7434. Emisiile NOx comparative pentru motorul diesel ISUZU 4JB1, sarcină 100% la 2300r.p.m.

Ca și în cazul precedent, cele mai favorabile valori ale NOx de doar 17ppm apar în cazul ejecției vaporilor de AdBlue din celulele piezoelectrice în cazul sarcinii pline. Preîncălzirea în cazul ejecției asigură o reducere mai rapidă a nivelului NOx decât în lipsa acesteia (timp  $< 23s$ ), însă valorile stabilizate arată o eficiență mai crescută în absența preîncălzirii.

În cazul sarcinii de 25%, respectiv, 50% cele mai mici valori ale NOx corespund ejecției cu preîncălzirea amestecului vaporii-gaze de evacuare. O dată cu creșterea sarcinii, temperaturile procesului de ardere și a gazelor de evacuare devin mai ridicate, caz în care preîncălzirea nu mai are efectul scontat. Acest lucru se poate vedea cu ușurință la sarcinile de 75% și 100%.

### 5.7.6 Compararea rezultatelor experimentale cu cele din cercetări similare

În contextul validării gradului de depunere a AdBlue în SCR, literatura de specialitate a evidențiat o serie de metode de amestecare pentru optimizarea reducerii reziduurilor de uree. Studiul efectuat de Zhang C., ș.a., [ZH19], analizează și verifică uniformitatea mixturii gazelor de evacuare cu picăturile soluției de AdBlue și performanța sistemelor de amestecare la temperaturi scăzute. Figura 5.75-a reprezintă depunerile de uree rezultate în urma unui ciclu de testare de 5h pe un stand cu motor diesel cu puterea de 97kW și frână dinamometrică.

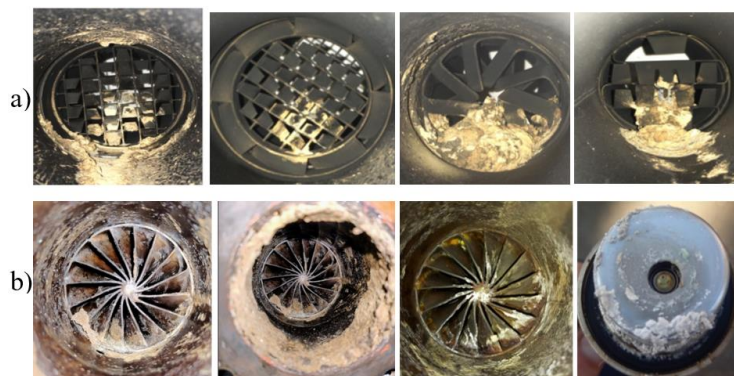


Fig. 5.75a-b. Studiul depunerilor SCR (experimental): a) Zhang C., ș.a. [ZH19], b) Picus, [PC23].

Rezultatele din figura 5.75-b reprezintă depunerile solide ale sărurilor de AdBlue obținute din experimentele efectuate de autorul tezei, în cazul utilizării injectorului AdBlue la SCR. În

ambele cazuri se observă același grad de acumulare a depunerilor și acoperirea parțială a trecerii vaporilor de AdBlue.

Figura 5.76-a ilustrează evoluția temperaturii gazelor de evacuare în fiecare punct de intrare și ieșire din catalizatoare, conform &5.7, la utilizarea sistemului de preîncălzire prin inducție, cu o valoare a puterii de  $0.5kW$ .

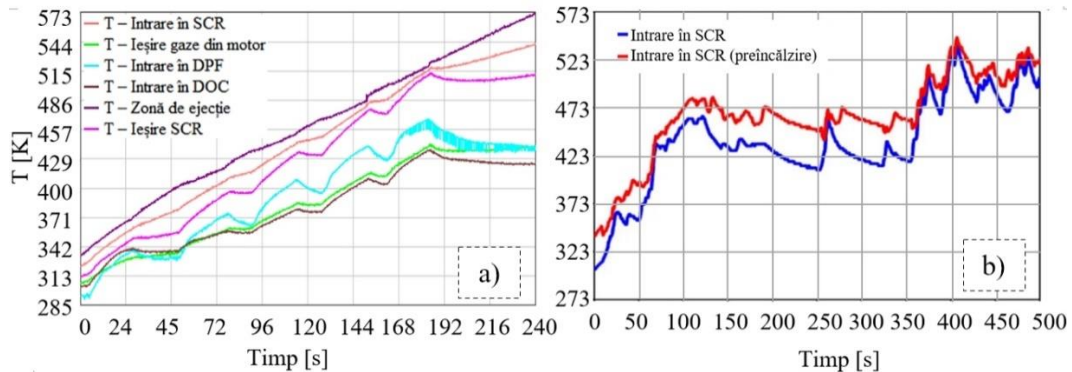


Fig. 5.76a-b. Variația temperaturii SCR cu preîncălzire: a) rezultate autor, b) rezultate [SU23]

Sun, ș.a., [SU23], au efectuat studii experimentale privind managementul termic al sistemului SCR la un motor diesel cu emisii scăzute de oxizi de azot. Potrivit studiului, au introdus preîncălzirea gazelor de evacuare pentru reducerea suplimentară a NOx. Aceștia au utilizat un încălzitor de  $7,2kW$  și au obținut o diminuare a concentrației de NOx cu 40%. Variația temperaturii până la 500s a fost de tip tranzitoriu după care regimul termic s-a stabilizat. În acest timp, SCR cu preîncălzire a înregistrat o creștere cu 25% a temperaturii gazelor de evacuare. Evoluția curbelor de temperatură, [SU23], este reprezentată în figura 5.76-b.

Se poate observa că în ambele cazuri ale determinărilor lui Sun, [SU23], după 240s, temperatura gazelor de evacuare are o valoare de 523K, apropiată pentru preîncălzire și funcționarea fără acest sistem. În mod comparativ, în cazul autorului, în același interval de timp s-a înregistrat valoarea de 544K la sistemul cu preîncălzire inductivă, intrare în SCR. Valorile obținute experimental pentru un sistem cu preîncălzire arată că la intrarea în fagurele SCR sunt destul de apropiate la cei doi autori.

Lukas ș.a., [LU22], au analizat gradul de stocare a NOx în timpul pornirii la rece în fagurele SCR, pe un motor diesel de 3.0l. Ciclul de testare s-a realizat într-o perioadă de câteva sute de secunde. Motivul duratei alese este dat de faptul că în primele secunde ale ciclului are loc absorbția și desorbția NOx la activarea sarcinii motorului. Conform figurii 5.77, pentru primele 75s, emisiile de NOx după catalizatorul SCR prezintă valori reduse. După aceea, emisiile de NOx se situează sub  $100ppm$ , iar la aproximativ 98s apare un vârf al emisiilor de NOx.

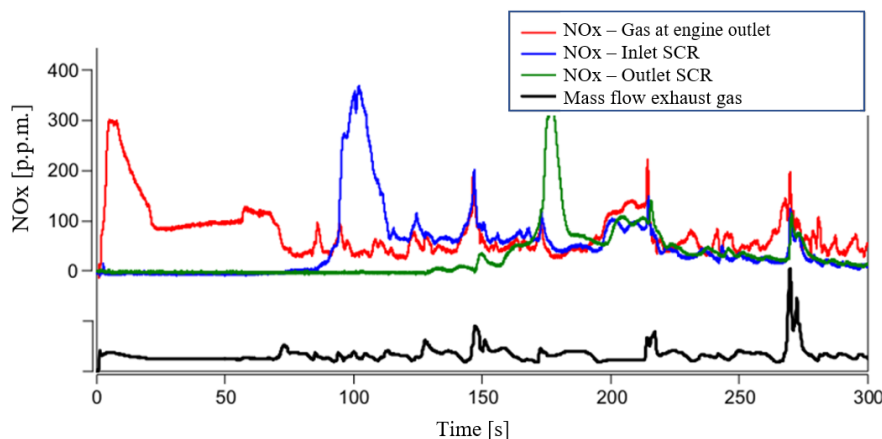
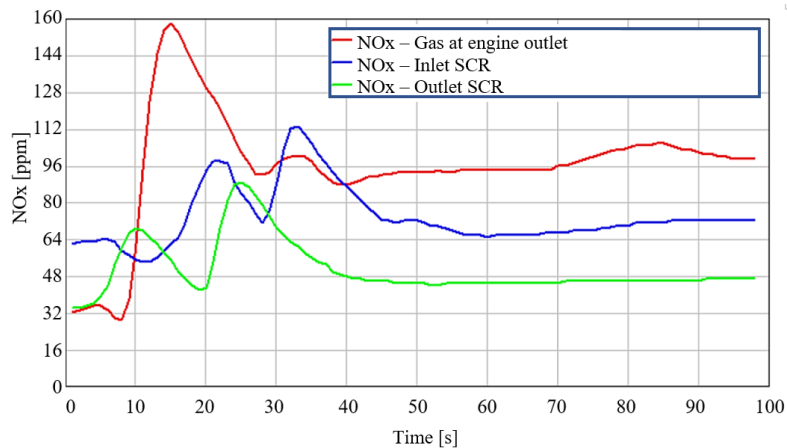


Fig. 5.77. NOx în primele 300 de secunde, [LU22], (experimental).



Comparativ cu Lukas ș.a., [LU22], în figura 5.78 se poate observa o aceeași alură a curbelor NOx în momentul intrării în sarcină a motorului ISUZU 4JB1 (la determinările efectuate de autor).



**Fig. 5.78. NOx în primele 100s, pornire la rece, [autor].**

Comparând alura graficelor pentru NOx la cei doi autori, devine vizibil decalajul celor două vârfuri, unde cel de culoare roșie reprezintă măsurătoarea înaintea catalizatoarelor, iar cel albastru la intrarea în SCR. Linia verde din grafice marchează valoarea concentrației de NOx la ieșirea din fagure. Defazajul curbelor denotă faptul că NOx este acumulat pentru o perioadă de timp în fagurele SCR.

## 6. CONCLUZII ȘI DIRECȚII DE CERCETARE

Cercetările efectuate pe parcursul elaborării acestei teze de doctorat sunt justificate de cerințele Consiliului European care, în contextul normelor Euro7, a convenit reducerea emisiilor de CO<sub>2</sub> și NO<sub>x</sub> față de cerințele actuale. Deși se dorește reducerea utilizării motoarelor diesel, acest lucru nu este justificat datorită eficienței ridicate a acestei categorii de motoare cu ardere internă, și faptului că acestea sunt indispensabile în domenii precum transportul feroviar, maritim, și transportul rutier greu.

Studiile efectuate până în prezent, reflectă faptul că în perioada pornirii și funcționării la rece, motoarele diesel emit noxe în cantități mai mari, comparativ cu funcționarea la temperaturi normale de lucru. În acest context, în prima parte a prezentei lucrări, s-a efectuat o analiză a literaturii de specialitate privind diferite configurații ale sistemelor de purificare a gazelor de ardere existente, studiindu-se diferite variante constructive, avantajele și dezavantajele modelelor existente. În urma studierii literaturii de specialitate, s-au identificat problemele care pot apărea în sistemele SCR. Unele soluții constructive propuse sunt orientate către preîncălzirea gazelor de evacuare înainte de intrarea acestora în SCR. O altă direcție abordată o reprezintă creșterea gradului de atomizare a picăturilor de AdBlue injectate în tubulatura de evacuare. S-a acordat o mare importanță limitelor de temperatură la care apar depuneri solide de reziduuri la injectarea AdBlue în sistemele SCR. În lipsa unui control adecvat al vaporizării picăturilor de AdBlue, pot apărea două situații nefavorabile. Una constă în introducerea unor cantități prea mari de NH<sub>3</sub> în sistemul SCR, fapt care conduce la apariția unui exces de amoniac eliberat în mediul înconjurător. Această situație este responsabilă de apariția unor depuneri de uree și a subproduselor rezultate în urma descompunerii soluției de AdBlue. În aceste situații, pe pereții canalizației de evacuare și pe microcanalele fagurelui din structura SCR se pot forma acumulări solide cristaline (adesea de culoare albă) apărute în urma evaporării apei din soluția AdBlue. A doua situație nefavorabilă este cea în care, la o cantitate prea mică de NH<sub>3</sub> introdusă în sistem, apare riscul de a nu elimina suficient NO<sub>x</sub>.

### 6.1 Contribuții teoretice privind influența temperaturii gazelor de evacuare a motoarelor diesel la eliminarea depunerilor de reziduuri de AdBlue și diminuarea noxelor

În prima parte a tezei au fost studiate sistemele de reducere catalitică selectivă dezvoltate până în prezent și s-a realizat o clasificare a metodelor propuse de diverși autori care pot asigura o conversie NO<sub>x</sub> cât mai eficientă în perioada de funcționare a motorului, atât la cald cât și la rece. În urma analizei bibliografice efectuate, a rezultat că este necesar să se facă demersuri în optimizarea procesului de vaporizare și preîncălzire a gazelor de evacuare. Din analiza literaturii de specialitate, *s-a constatat că prin controlul precis al unor parametri, precum dimensiunea picăturilor și temperatura gazelor de ardere, se poate obține un SCR mai eficient la care se asigură reducerea sau chiar eliminarea depunerilor.*

În prezenta lucrare se aduc următoarele contribuții teoretice:

1. În capitolul unu s-au descris configurațiile SCR dezvoltate până în prezent, atât pentru autovehiculele ușoare (tabelul 1.2), cât și pentru autovehiculele grele (tabelul 1.3). S-a realizat *o sinteză* care include modelele constructive propuse pentru creșterea eficienței sistemelor SCR. Scopul acestui demers a fost acela de a evidenția care sunt cele mai relevante avantaje aduse de sistemele proprii propuse pentru modernizarea SCR și de a stabili performanțele dezvoltate.
2. S-a *realizat o analiză comparativă* a celor mai noi tendințe în dezvoltarea SCR, (figura 1.4) și a adus *completări privind noile direcții de cercetare propuse*. S-a realizat o clasificare a metodelor utilizate pentru scăderea emisiilor motoarelor diesel.
3. *S-au stabilit cauzele și factorii de influență a apariției, dezvoltării și depunerilor reziduurilor solide de uree*, identificând intervalele de temperatură în care apare

fenomenul de pseudo-desublimare a ureei. S-a stabilit care este influența temperaturii peretelui canalizației de evacuare asupra formării depunerilor solide la injecția de AdBlue. În același context, *a evaluat dinamica evoluției procesului de injecție* în timp (figura 1.22).

4. Identificând modul de interacțiune a picăturilor de AdBlue cu peretele SCR, *s-a constatat necesitatea fragmentării picăturilor de AdBlue* cu scopul de a obține reacții de selectivitate mai rapide în fagurele catalizatorului, scăderea consumului de substanță și protecția SCR.
5. O altă preocupare a reprezentat-o *studiul factorilor care asigură creșterea eficienței sistemelor SCR* la injecția AdBlue, motiv pentru care s-a evaluat modul în care temperatura gazelor de evacuare influențează conversia NOx. Dată fiind corelația dintre diametrul picăturilor de AdBlue și transferul termic de la gazele fierbinți, *s-a constatat că în cazul în care picăturile sunt antrenate în mișcare de fluidul gazos, vaporizarea decurge în volum, caz în care apar fenomene de tip convectiv.*
6. *S-au trasat grafice în coordonate tridimensionale* (figura 3.2), *pentru determinarea temperaturii fazei lichide în dependență de timp funcție de spațiul străbătut de picături într-un mediu gazos cu temperatură ridicată.* La baza codurilor au stat relațiile matematice din &3.2 fără a se lua în considerare fenomenul de difuzie termică (cod Mathcad prezentat în ANEXA 1).
7. În baza relațiilor de calcul din subcapitolul 3.3 *s-au trasat curbele pentru variația coeficientului de difuzie cu temperatura gazelor de ardere* (figura 3.3), *la diferite presiuni de lucru din galeria de evacuare* (conform cu ANEXA 2). Modelul corespunde injecției de AdBlue în volum când s-a luat în considerare și coeficientul de difuzie.
8. *S-a efectuat o comparație a variației coeficienților de difuzie termică* pentru apă distilată și AdBlue *în funcție de temperatura mediului gazos*, luând în considerare presiunea din tubulatura de evacuare (figura 3.4).
9. *S-a determinat prin calcul conform figurilor 3.5-3.7 variația în timp a diametrului picăturilor de AdBlue, funcție de temperatura gazelor de evacuare în cazul în care este luat în calcul sau nu coeficientul difuziv*, pentru a studia modul în care dimensiunea picăturilor influențează eficiența procesului de conversie a soluției de AdBlue în catalizatorul SCR. *S-a stabilit că viteza de curgere a gazelor influențează favorabil timpul de vaporizare* a picăturilor.
10. Cu ajutorul codului Mathcad din ANEXA 4 care are la bază relația 3.29, *s-a calculat cum se modifică în timp diametrul picăturilor de AdBlue care vin în contact cu o suprafață fierbinte*, în funcție de temperatura acesteia, graficele obținute fiind prezentate în figura 3.9. În urma calculelor *s-a stabilit că o creștere a temperaturii suprafeței de contact conduce la accentuarea procesului de vaporizare* a picăturilor de AdBlue.
11. În subcapitolul 3.5, în urma analizei procesul de vaporizare și în baza bibliografiei studiate, *s-a stabilit experimental că apare o creștere a coeficientului de transfer de căldură la aplicarea undelor ultrasonice asupra unei pelicule de AdBlue. Se afirmă că într-un mediu ultrasonor apare și o accentuare a transferului de masă*, datorată creșterii turbulenței în stratul limită și în volumul fluidului, cât și prin creșterea suprafeței de contact între faze.
12. În &3.5.2 *se arată prin simulări* (ANEXA 6) *care este influența temperaturii gazelor de evacuare asupra ratei de vaporizare a picăturilor de AdBlue, în prezența sau absența undelor ultrasonore. Constată că (&3.6) utilizând ultrasunete rata de evaporare crește odată cu temperatura mediului de lucru și că se intensifică semnificativ transferul de căldură în centrul picăturii* de AdBlue.
13. *S-a realizat simulări în mediul de programare ANSYS (&3.7.1.-&3.7.4) pentru studierea dinamicii și vaporizării picăturilor de AdBlue* utilizând modelul VOF, *a*

variației temperaturii în zona de preîncălzire locală a tubulaturii de evacuare cât și pentru simularea schimbului termic convectiv la injecția AdBlue într-un mediu gazos fierbinte. Rezultatele simulărilor sunt prezentate în figurile 3.17-3.29. **S-a stabilit prin simulări că valorile maxime ale câmpului de concentrație a vaporilor se ating la marginea superioară a picăturii.**

14. În &3.8. **s-a efectuat simularea proceselor din sistemele de conversie a noxelor la motoarele diesel** folosind o modelare în Matlab Simulink. În figura 3.31 sunt date rezultatele simulării cu evoluția noxelor funcție de turație și regimul de frânare prestabilit. Datele obținute prin simulare permit compararea valorii NOx cu cele experimentale.

## 6.2 Contribuții aduse la conceperea de standuri și echipamente destinate reducerii depunerilor și noxelor în sistemele SCR

Luând în considerare analiza stadiului actual și obiectivele propuse în cadrul acestei lucrări, s-au conceput o serie de soluții constructive destinate optimizării SCR. Prin soluțiile propuse se urmărește reducerea riscului de acumulare a depunerilor de uree în galeria de evacuare a autovehiculelor diesel, luând în considerare temperatura gazelor de evacuare a motorului cât și creșterea eficienței catalizatorului SCR.

Soluțiile conceptuale propuse exploatează modalități de sporire a transferului de căldură și masă, în vederea prevenirii formării depunerilor de uree în sistemele de reducere catalitică selectivă (SCR), cu precădere în timpul funcționării motorului diesel la temperaturi scăzute ale lichidului de răcire, sub 70°C (la rece). Astfel, s-au adus o serie de contribuții prin conceperea unor standuri și echipamente, după cum urmează:

1. **Conceperea unui stand experimental pentru studiul pseudo-desublimării** (figura 2.1), cu ajutorul căruia se pot simula condițiile critice (fizico-chimice și dinamice) ce pot apărea în zona SCR. Standul propus permite urmărirea modului în care apar, se depun și se dispersează sărurile de AdBlue funcție de nivelul de temperatură. Se urmărește să se stabilească științific evoluția fenomenului de pseudo-desublimare.
2. **Implementarea unui sistem SCR clasic pe motorul diesel 4JB1 ISUZU** (figura 2.2), destinat reducerii noxelor, utilizând diferite configurații constructive. Contribuțiile aduse au ca element de noutate posibilitatea utilizării preîncălzirii gazelor de evacuare și utilizării ultrasunetelor pentru intensificarea atomizării picăturilor de AdBlue.
3. **Conceperea unui sistem de amestecare și transport de masă a picăturilor atomizate ale soluției de AdBlue**, (figura 2.4). S-a proiectat un sistem de ejecție care asigură o amestecare eficientă a picăturilor de AdBlue cu gazele de evacuare, precum și transportul amestecului în amonte de catalizatorul SCR. Utilizarea soluției propuse poate preveni acumularea de depuneri solide și eficientizarea procesului de reducere a emisiilor de oxizi de azot (NOx).
4. **Proiectarea unui dispozitiv magnetostrictiv pentru fragmentarea peliculară a soluției de AdBlue injectată pe un disc**, (figura 2.5). Conform &2.5, utilizând ultrasunete generate prin metoda magnetostricțiunii, s-a conceput un sistem care intensifică puternic fragmentarea peliculei de AdBlue formată prin injecție pe un disc de aluminiu.
5. **Introducerea conceptului de utilizare a celulelor piezoelectrice pentru generarea vaporilor de AdBlue** care asigură o atomizare puternică a soluției în vapori introduși prin ejecție în zona SCR. În figura 2.12 este prezentat mecanismul de generare a vaporilor iar în figura 2.13 se găsește schema de principiu și componentele sistemului.
6. **Conceperea unui sistem de preîncălzire inductiv format dintr-un fagure metalic amplasat în interiorul canalizației SCR** care ajută prin intensificarea temperaturii gazelor de evacuare la creșterea eficienței conversiei NOx, (figura 2.17). Se preconizează utilizarea acestui sistem cu precădere la pornirea la rece a motorului diesel (în primele minute) prin asigurarea unei temperaturi optime a gazelor de evacuare.



### 6.3 Contribuții privind realizarea părții experimentale destinate reducerii depunerilor și noxelor la sistemele SCR în dependență de temperatura de evacuare a motoarelor diesel

Echipamentele experimentale sunt necesare pentru investigarea influenței temperaturii gazelor de evacuare a motoarelor diesel, pentru determinarea cantităților de noxe și a mecanismelor formării depunerilor solide la injecția AdBlue în SRC. În acest scop, s-au construit o serie de standuri și echipamente experimentale, aducându-se contribuțiile:

1. **Realizarea unui stand experimental destinat studiului pseudo-desublimării** care să faciliteze înțelegerea proceselor care au loc la injecția soluției de AdBlue într-un sistem SCR, în care rezultă depuneri solide de săruri. Testele de laborator au demonstrat că, în anumite condiții, poate să apară fenomenul de pseudo-desublimare. Standul experimental construit (figura 4.1), permite determinarea etapelor de transformare a unor picături lichide în contact cu suprafețe foarte fierbinți (sute de  $K$ ) în depozite solide și identificarea apariției unui posibil efect de deflagrație a depunerilor.
2. **Realizarea unui stand experimental pentru studiul calefacției** (figura 4.2), care permite studierea fenomenului de împiedicare a formării depunerii solide a sărurilor de AdBlue. Are la bază efectul introducerii de vibrații induse de unde ultrasonice, generate prin metoda magnetostricțiunii, care asigură fragmentarea suplimentară a jetului de AdBlue.
3. **Implementarea unui sistem de injecție a soluției de AdBlue pe sistemul SCR al motorului diesel** conform &4.5. destinat studiului injecției de AdBlue, formării depunerilor și reducerii noxelor în dependență cu temperatura gazelor de evacuare a motorului diesel.
4. **Adaptarea unui sistem SCR la standul motorului diesel GTAT-T003&GTAT-T009** în diferite configurații (&4.9): clasic cu injecție de AdBlue, cu ejecția vaporilor din celule piezoelectrice cu sau fără preîncălzire și cu injecție de AdBlue pe discul unui concentrator magnetostrictiv cu sau fără preîncălzire.
5. Așa cum se arată în &4.6, au fost aduse contribuții privind **realizarea unui sistem de ejecție** care să asigure o distribuție uniformă a picăturilor injectate de AdBlue în gazele de evacuare (figurile 4.7÷4.8). Rolul acestui sistem este de a **îmbunătăți procesul de atomizare și de a asigura o creștere a vitezei de vaporizare** a picăturilor de AdBlue, fenomene care conduc la mărirea eficienței de descompunere a ureei în catalizatorul SCR.
6. **Realizarea unui sistem bazat pe celule piezoelectrice care generează vapori de AdBlue** (figurile 4.8÷4.9), care sunt transportați spre centrul canalizației de evacuare prin sistemul de ejecție, în amonte de fagurele SCR.
7. Pentru studiul experimental al propunerii de eficientizare a conversiei NO<sub>x</sub> prin intensificarea temperaturii gazelor de evacuare, **s-a realizat un sistem de preîncălzire prin inducție** (figura 4.10) alcătuit dintr-un fagure metalic prin care trec gazele de ardere (figurile 4.12÷4.13). Controlul electronic al preîncălzirii este asigurat de doi senzori de temperatură și o placă de dezvoltare (figura 4.11).
8. Pentru monitorizarea temperaturii gazelor de evacuare în punctele de interes (intrare/ieșire din catalizatoarele SCR), **a conceput și realizat un sistem de monitorizare a temperaturii cu achiziția datelor pe platforma ArduinoUno**, (figura 4.15), în care a implementat șase senzori de temperatură, a căror indicații sunt preluate în timp real și transferate către un PC.

### 6.4 Contribuții aduse la obținerea și interpretarea rezultatelor experimentale

Analiza rezultatelor experimentale dorește să evidențieze efectul soluțiilor propuse pentru stabilirea influenței temperaturii gazelor de evacuare asupra formării depunerilor solide la injecția de AdBlue cât și a impactului asupra noxelor produse de un motor diesel. Cercetările experimentale s-au desfășurat în baza unui plan de experimente, descris în &5.1.

S-au adus următoarele contribuții asupra obținerii și interpretării rezultatelor experimentale:

1. Au fost stabilite experimental **prin calorimetrie cu scanare diferențială (&5.2.) fazele prin care trece soluția de AdBlue**. Rezultatele obținute experimental pentru soluția de AdBlue prin tehnica DSC se regăsesc în figura 5.1. Diagrama generată prin calorimetria cu scanare diferențială a permis determinarea temperaturilor de tranziție, a punctului de topire/fierbere, timpului și temperaturii de cristalizare, gradului de cristalinitate, căldura de dizolvare și cea schimbată în timpul reacțiilor, căldura specifică, stabilitatea oxidativă / termică, cinetica reacțiilor și puritatea probelor. Determinările experimentale arată că descompunerea ureei este determinată în baza echilibrului termodinamic format de biuret, triuret și acid izocianic.
2. În &5.3 **se pune în evidență apariția și dezvoltarea procesului de pseudo-desublimare a picăturilor de AdBlue. Au fost realizate filmări rapide (240FPS)**, care dovedesc că la temperaturi  $T \leq 373K$  **debutează** fenomenului de vaporizare, fără apariția depunerilor, la  $T \in 373 \div 408K$  **debutează procesului de pseudo-sublimare**, iar la temperaturi  $T > 523K$  **apare deflagrația depunerilor solide**.
3. **Prin microscopie cu scanare diferențială SEM (&5.4), s-au analizat structura depunerilor solide obținute** din soluția de AdBlue injectată pe suprafețe fierbinți. Analiza prin microscopie digitală a reziduurilor de AdBlue au arătat că apar variații structurale în microcanalele fagurelui SCR. S-a dovedit experimental apariția incipientă a unor formațiuni aciculare pe muchiile frontale ale microcanalelor, (figura 5.16), dezvoltarea unor depuneri pe muchii, în colțul și în interiorul microcanalelor (figura 5.17), creșterea depunerilor cu acoperirea parțială sau totală a *microcanalelor* (figura 5.17) și la obturarea parțială sau totală a unei *zone din fagurele SCR*, (figura 5.18).
4. Folosind tehnica filmării rapide și pe cea în IR s-a pus în evidență pe cale experimentală eficiența metodelor de **intensificare a procesului de atomizare prin implementarea unui concentrator magnetostriktiv** a picăturilor de AdBlue. Astfel, figurile 5.21÷5.22 ilustrează intensificarea atomizării picăturilor de AdBlue, iar figurile 5.23÷5.24 arată cum are loc procesul de calefacție.
5. **Analiza prin microscopie confocală** a permis studierea microtopografiilor unor suprafețe cu depuneri reziduale obținute cu și fără prezența ultrasunetelor. Rezultatele analizei suprafețelor (figurile 5.26÷5.30) au demonstrat eficacitatea soluției propuse (de utilizare a ultrasunetelor).
6. În cazul generării vaporilor de AdBlue extern galeriei de evacuare prin efect piezoelectric și ejectării acestora în amonte de fagurele SCR, **s-a interpretat că presiunea de alimentare a ejectorului nu influențează în mod semnificativ atomizarea picăturilor de AdBlue** la ieșirea din acesta întrucât acestea sunt deja atomizate de celulele piezoelectrice. Atomizarea picăturilor de AdBlue este deosebit de importantă pentru sistemele SCR, întrucât prin amestecarea picăturilor cu gazele de evacuare fierbinți **se intensifică atât de pronunțat fenomenul de vaporizare încât acesta decurge cvasi-instantaneu**. Vaporizarea rapidă a micropicăturilor generează componente chimice mai active, care facilitează amestecarea cu gazele de evacuare și implicit reducerea emisiilor de NOx. Prin asigurarea unei uniformități a amestecului micropicături-gaze de evacuare, **probabilitatea formării depozitelor solide nedorite este redusă în mod semnificativ**.
7. O altă contribuție experimentală a fost **analiza termografică a tubulaturii de evacuare**, în zona SCR. Prin această analiză s-au putut constata că în conformitate cu figura 5.33 în condiții de funcționare la rece a motorului diesel, temperatura maximă a atins 406,1K, cu scăderi ale temperaturii în zona de injecție de până la 289K, (figura 5.34). Aceste **variații de temperatură pot influența reacțiile chimice și performanța catalizatorului SCR**. Analiza datelor termografice (figura 5.35) a indicat o creștere bruscă a temperaturii între

24 și 42 de secunde de la pornire. Acest fenomen poate fi relevant pentru evaluarea eficacității sistemului SCR în procesarea emisiilor de NOx.

8. **Implementarea metodei inductive de preîncălzire a gazelor de evacuare** pentru compensarea fenomenelor nedorite ce apar datorită funcționării catalizatorului SCR la temperaturi prea scăzute, a fost de asemenea analizată termografic. S-a arătat astfel că sistemul de preîncălzire, prin utilizarea unei bobine de inducție, generează temperaturi mai ridicate în zona ejectorului. S-a evaluat temperatura pe fiecare tronson al sistemului SCR și s-a demonstrat eficacitatea sistemelor implementate (&5.7).
9. Pentru a se verifica experimental eficiența soluțiilor propuse în cadrul tezei, pe baza planului experimental descris în subcapitolul 5.1, **au fost efectuate măsurători cu un analizor de gaze TESTO 300 NEXT LEVEL, pentru fiecare configurație a sistemului SCR.** Datele experimentale centralizate pentru pornirea la rece a motorului diesel ISUZU 4JB1 cât și pentru exploatarea acestuia la cald sunt prezentate în tabelul 6.1.

**Tab. 6.1. Centralizarea rezultatelor obținute pentru NOx motor ISUZU rece/cald.**

Cazuri experimentale	Motor rece T < 343K		Motor cald T > 343K	
	Max	Stabilizare	Max	Stabilizare
	NOx [ppm]	NOx [ppm]	NOx [ppm]	NOx [ppm]
0% 1000r.p.m. fără SCR	129	<b>125</b>	132	<b>98</b>
0% 1000r.p.m. injector	91	<b>81</b>	110	<b>62</b>
0% 1000r.p.m. injector-preîncălzire	88	<b>81</b>	93	<b>79</b>
0% 1000r.p.m. ejector	61	<b>62</b>	79	<b>56</b>
0% 1000r.p.m. ejector-preîncălzire	71	<b>49</b>	61	<b>49</b>
25% 1350r.p.m. fără SCR	158	<b>99</b>	160	<b>90</b>
0% 2100r.p.m. fără SCR	175	<b>138</b>	170	<b>91</b>
75% 2850r.p.m. fără SCR	175	<b>104</b>	173	<b>110</b>
100% 3600r.p.m. fără SCR	224	<b>138</b>	185	<b>120</b>
25% 1350r.p.m. injector	120	<b>99</b>	130	<b>80</b>
50% 2100r.p.m. injector	139	<b>100</b>	160	<b>110</b>
75% 2850r.p.m. injector	152	<b>105</b>	162	<b>100</b>
100% 3600r.p.m. injector	168	<b>113</b>	172	<b>111</b>
25% 1350r.p.m. ejector	88	<b>48</b>	90	<b>36</b>
50% 2100r.p.m. ejector	94	<b>54</b>	144	<b>42</b>
75% 2850r.p.m. ejector	123	<b>61</b>	158	<b>93</b>
100% 3600r.p.m. ejector	192	<b>20</b>	169	<b>112</b>
25% 1350r.p.m. ejector-preîncălzire	40	<b>12</b>	40	<b>10</b>
50% 2100r.p.m. ejector-preîncălzire	89	<b>47</b>	83	<b>50</b>
75% 2850r.p.m. ejector-preîncălzire	127	<b>89</b>	86	<b>50</b>
100% 3600r.p.m. ejector-preîncălzire	151	<b>107</b>	91	<b>43</b>
25% 1350r.p.m. injector-preîncălzire	112	<b>38</b>	92	<b>27</b>
50% 2100r.p.m. injector-preîncălzire	113	<b>72</b>	124	<b>65</b>
75% 2850r.p.m. injector-preîncălzire	138	<b>91</b>	134	<b>90</b>
100% 3600r.p.m. injector-preîncălzire	149	<b>90</b>	157	<b>104</b>

Analiza datelor experimentale, a relevat că utilizarea sistemelor propuse, destinate îmbunătățirii conversiei emisiilor de NOx, prin utilizarea:

- concentratorul magnetostriktiv generator de ultrasunete;
- celulelor piezoelectrice de generare a vaporilor de AdBlue;
- unui ejector pentru transport și amestecare a picăturilor cu gazele de evacuare;
- sistemului inductiv de preîncălzire a gazelor de evacuare realizat sub forma unui fagure metalic introdus în interiorul canalizației SCR,

**au un impact semnificativ asupra reducerii emisiilor de NOx** în motorul diesel ISUZU 4JB1 pentru situațiile favorabile (marcate cu verde) din tabelul 6.1.

### 6.5 Direcții de cercetare

Analizând rezultatele obținute teoretic și experimental, formulările făcute privind evoluția proceselor la utilizarea AdBlue în practica motoarelor diesel cât și concluziile formulate, se desprind următoarele direcții de cercetare:

Teoretice

1. Necesitatea dezvoltării de noi modele matematice care să ia în considerare efectele tranzitorii din faza gazoasă în special pentru condiții de presiune și temperatură ridicate.
2. Investigarea ulterioară a modelului picăturilor de AdBlue în ipoteza că acestea au alte forme decât cea sferică (cum s-a considerat prin ipoteză) în prezenta lucrare.
3. Dezvoltarea unor metode matematice de tipul DNS Eulerian care ar putea fi folosite în viitor pentru studiul evaporării picăturilor, modelării coliziunilor picăturilor și influenței turbulențelor asupra vaporizării acestora.
4. Îmbinarea modelului de vaporizare în regim pelicular cu termoliza ureei.

Conceptuale:

1. Modificarea calculatorului motoarelor diesel, prin reconfigurarea bazelor de date interne luând în considerare introducerea de AdBlue prin atomizare.
2. Optimizarea sistemului de injecție prin funcționarea acestuia în concordanță cu generatorul de ultrasunete.
3. Implementarea unui recuperator de căldură în zona de preîncălzire a gazelor pentru compensarea energiei electrice utilizate pentru încălzire.
4. Controlul celulelor piezoelectrice în vederea unei dozări a micropicături raportate la regimul de funcționare a motorului diesel.



## BIBLIOGRAFIE (Selectivă)

- [AA99] Amuzescu A., Popovici D., [Curs de electrotehnică], Politehnica București Catedra de electrotehnică, Editura Printech București, I.S.B.N. 973-9402-34-8; Ed.Printech 1999.
- [AB06] Avvaru, B., Patil, M. N., Gogate, P. R., ș.a., "*Ultrasonic atomization: effect of liquid phase properties*" Ultrasonics, 44(2), 146-158, 2006.
- [AB22] Ashok, B., [NOx Emission Control Technologies In Stationary And Automotive Internal Combustion Engines], Approaches Toward NOx Free Automobiles, Elsevier, Vellore Institute of Technology, Vellore, Tamil Nadu, India, ISBN: 978-0-12-823955-1, 459 pag., 2022.
- [AH62] Andersen H.C., [Method of purifying gases containing oxygen, oxides of nitrogen], U.S., Patent 3053613 A, 1962.  
<https://patents.google.com/patent/US3053613>
- [AM15] Asif M., Zhang Y, and Lin W., "*Urea-SCR Temperature Investigation for NOx Control of Diesel Engine Low Emission Vehicles Research Laborator*., Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China, MATEC Web of Conferences 26, published by EDP Sciences, 03002-p.1÷ 03002-p.4, 2015.
- [AT19] Terzis A., Kirsch M., Vaikuntanathan V., "*Splashing characteristics of diesel exhaust fluid (AdBlue) droplets impacting on urea-water solution films*", Institute of Aerospace Thermodynamics, University of Stuttgart, Pfaffenwaldring 31, 70569 Stuttgart, Germany, Experimental Thermal and Fluid Science, 102, 152-162, 2019.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0894177718315802>.
- [BA11] Brin A. A., Fisenko S. P., Khodyko Y. A., "*Characteristic features of evaporative cooling of droplets in high-temperature flows*", Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 84, 292-297, 2011.
- [BA12] Bernhard A.M., Peitz D., Elsener M., ș.a., "*Hydrolysis and thermolysis of urea and its decomposition byproducts biuret, cyanuric acid and melamine over anatase TiO<sub>2</sub>*", Applied Catalysis B: Environmental, ISSN 0926-3373, Volumes 115-116, pag. 129-137, 2012.  
<https://DOI.org/10.1016/j.apcatb.2011.12.013>,
- [BC\*\*] *Basic Concepts in Environmental Sciences*. Environmental Protection Agency Air Pollution Training Institute, AirKnowledge.  
<https://airknowledge.gov/BASC-SI.html>, accesat la data 1.11.2024.
- [BF07] Birkhold F., Meingast U., Wassermann P., ș.a., "*Modeling and simulation of the injection of urea-water-solution for automotive SCR DeNOx-systems*", Applied Catalysis B: Environmental, pag. 119-127, 2007.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337306002402>.
- [BK18] Boriboonsomsin K., Durbin T., "*Real-world exhaust temperature profiles of on-road heavy-duty diesel vehicles equipped with selective catalytic reduction*", Sci Total Environ. Sep 1; 634: pag. 909-921, 2018.
- [BM11] Bruce G. M., [Clean Coal Engineering Technology], Elsevier, ISBN 978-1-85617-710-8, Oxford, 661 pag., 2011.
- [BN16] Burnete N.V., [Studii și cercetări privind influența injecției de combustibil asupra emisiei de poluanți la motoare cu aprindere prin comprimare], teză de doctorat, Facultatea de Mecanică, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 164 pag., 2016.  
<https://rei.gov.ro/teza-doctorat-document/84985e6b7953a2015-.Teza-doctorat-semnat.pdf>
- [BS03] Brian S., William R.M., ș.a., "*Recent DPF/SCR Results Targeting US2007 and Euro 4/5 HD Emissions*", SAE Technical Paper, DOI: 10.4271/2003-01-0774, No. 2003-01-0774, Detroit, Michigan, 13 pag., 2003.

- <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2003-01-0774/>.
- [BT16] Boningari T., Smirniotis G. P., "Impact of nitrogen oxides on the environment and human health: Mn-based materials for the NOx abatement", Science Direct, ISSN 2211-3398, Volume 13, Pag. 133-141, 2016.  
<https://DOI.org/10.1016/j.coche.2016.09.004>.
- [BW07] Babcock & Wilcox Co., [Steam, Its Generation and Use], Produced by: Juliet Sutherland, Tony Browne, and the Online Distributed Proofreading Team, Produced by: Juliet Sutherland, Tony Browne, and the Online Distributed Proofreading Team, Thirty-fifth Edition, 4th Issue, New York, 335 pag., 2007.  
<https://www.gutenberg.org/files/22657/22657-h/22657-h.htm>
- [CA24] DEXonline, Definiție Calefacție,  
<https://dexonline.ro/definitie/calefac%C8%9Bie>, accesat, 04.04.2023
- [CF82] Chiriac F., Leca A., ș.a., [Procese de transfer de căldură și de masă în instalațiile industriale], Editura Tehnică, București, 572 pag., 1982.
- [CH95] Cornelis H., Ruud P.V., ș.a., "Development of a Urea DeNOx Catalyst Concept for European Ultra-Low Emission Heavy-Duty Diesel Engines", SAE Technical Paper 2016-01-0927, DOI:10.4271/952652, pag., 675-683-9, 1995.  
<https://www.jstor.org/stable/44612160>.
- [CJ06] Cichanowicz J. E., Muzio L. J., "Twenty-five years of SCR evolution: Implications for US application and operation", Chicago, Proceedings of the EPRI-DOE-EPA Combined Power Plant Air Pollutant Control Symposium, The MEGA Symposium, pag. 20-23, 2006.
- [CJ61] Cohn J.G.E., Steele D.R., Anderaen H.C., "Method of selectively removing oxides of nitrogen from oxygen-containing gases", U.S. Patent 2975025 A., 1961.  
<https://patents.google.com/patent/CA982497A/en>
- [CM13] Camarillo M.K., Stringfellow W.T. ș.a., "Investigation of selective catalytic reduction for control of nitrogen oxides in full-scale dairy energy production," Elsevier, ISSN 0306-2619, vol. 106(C), pag. 328-336. 2013.  
<https://DOI.org/10.1016/j.apenergy.2013.01.066>.
- [CS94] Christopher S., McGregor D.B., "Emissions Control Technology for Locomotive Engines", SAE Technical Paper Series, Detroit, Michigan, 1994 doi: 10.4271/940453, 1994.  
<https://www.nettinc.com/industries/locomotive-equipment-emission-control-solutions>
- [DC91] David C., Glatch L., ș.a., "Application of selective catalytic reduction (SCR) technology for NOx reduction from refinery combustion sources", Environmental Progress, 10(1), DOI:10.1002/ep.670100116, pag. 49-59, 1991.  
<https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/DOI/abs/10.1002/ep.670100116>.
- [DS23] Dey S., Man A., Sahu K., Mandal B.K., "Effect of Induction Heating in Minimizing Cold Start Emissions in Catalytic Converter", Advances in Clean Energy and Sustainability, Green Energy and Technology. Springer, Singapore. pag. 355-365, 2023.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-99-2279-6\\_30](https://doi.org/10.1007/978-981-99-2279-6_30),
- [AE11] Alano, E., Jean, E., Perrot, Y., Brunel, J. et al., "Compact SCR for Passenger Cars," SAE Technical Paper, <https://doi.org/10.4271/2011-01-1318>. No. 2011-01-1318, 9 pag., 2011.  
<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2011-01-1318/>
- [EE16] European Environment Agency, "Explaining road transport emissions", Office of the European Union, ISBN 978-92-9213-723-6, DOI:10.2800/71804, EEA, Copenhagen, 54 pag., 2016.

- [ES11] Ebrahimian S.S. V., Doctoral dissertation, [Development of multi-component evaporation models and 3D modeling of NO<sub>x</sub>-SCR reduction system] Toulouse, 176 pag., 2011.
- [FR19] Felipe R., Francisco P., "*Future Heavy-Duty Emission Standards An Opportunity For International Harmonization*", International Council for Clean Transportation, Washington, DC, 29 pag., 2019.  
[https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Future-HDV\\_standards\\_opportunity\\_20191125.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Future-HDV_standards_opportunity_20191125.pdf).
- [FR24] FVV Research Project, "*Industrial Engines as Power Systems - Research for Optimum System Design*", Automotive, pag. 66-70, accessed 23.01.2024.  
[www.springerprofessional.com/automotive](http://www.springerprofessional.com/automotive)
- [FS04] Fisenko S.P., Brin, A.A., Petrushik, A.I., "*Evaporative cooling of water in a mechanical draft cooling tower*", International Journal of heat and mass transfer, 47(1), 165-177, 2004.
- [FU69] Fuller, E. N., Ensley, K., & Giddings, J. C., "*Diffusion of halogenated hydrocarbons in helium. The effect of structure on collision cross sections*", The Journal of Physical Chemistry, 73(11), pag. 3679-3685, 1969.
- [FX14] Feng, X., Ge, Y., Tan, J., ș.a., "*Effects of Electrically Heated Catalyst on the Low Temperature Performance of Vanadium-Based SCR Catalyst on Diesel Engine*", SAE Technical Paper DOI:10.4271/2014-01-1527, 2014.  
<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2014-01-1527/>.
- [GJ91] Gibson J., Groene O., 1991. "*Selective Catalytic Reduction on Marine Diesel Engines*", Automotive Engineering, pag. 18-22,1991.
- [GZ10] Guanyu Z., Adam F., Adam K., ș.a., "*Investigation of Urea Deposits in Urea SCR Systems for Medium and Heavy Duty Trucks*", SAE International, 10 pag., 2010.  
<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2010-01-1941/>.
- [HF96] Hanel, F. J., Otto, E., & Brück, R., "*Electrically Heated Catalytic Converter (EHC) in the BMW ALPINA B12 5.7 Switch-Tronic*", SAE Technical Paper Series 960349, SAE International Congress and Exposition Detroit, Michigan (Cobo Center), pag. 228-236, 1996.  
<https://www.jstor.org/stable/44729052>.
- [HI24\*] Hitachi SU-70 Analytical Field Emission, Accesat la data:18.03.2024.  
<https://m.indiamart.com/proddetail/hitachi-su-70-analytical-field-emission-21978260012.html>
- [HK89] Hellman K.H., Bruetsch R.I., Piotrowski, G.K., "*Resistive Materials Applied to Quick Light-off Catalysts*", SAE technical paper series 890799, U.S. Environmental Protection Agency, International Congress and Exposition Detroit, Michigan, pag. 406-415, 1989.  
<https://www.jstor.org/stable/44472040>
- [HM21] Hamed M.R., Doustdar O., Tsolakis A., Hartland J., "*Energy-efficient heating strategies of diesel oxidation catalyst for low emissions vehicles*", Elsevier, Energy, Volume 230, 120819, ISSN 0360-5442, 19 pag., 2021.  
<https://sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221010677>.
- [HU93] Hug H., Mayer A., ș.a., "*Off-Highway Exhaust Gas After-Treatment: Combining Urea-SCR, Oxidation Catalysis and Traps*", SAE Technical Paper 930363, ISSN: 0148-7191, International Congress and Exposition Detroit, Michigan, pagini, nr. pagini 143-154, 1993.  
<https://DOI.org/10.4271/930363>

- [JH04] Joon H.B., Sung D.Y., ş.a., "Control of NO<sub>x</sub> emissions from diesel engine by selective catalytic reduction (SCR) with urea", Catalysis Vols. 30/31, Nos. 1-4, July pag. 37-41, 2004.
- [KA18] Kiss, A. A., Geertman, R., Wierschem, M., ş.a., "Ultrasound-assisted emerging technologies for chemical processes", Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 93(5), pag. 1219-1227, 2018.  
<https://doi.org/10.1002/jctb.5555>,
- [KC12] Kim, C. H., Paratore, M., Gonze, E., "Electrically Heated Catalysts for Cold-Start Emissions in Diesel Aftertreatment", General Motors Company, SAE International DOI:10.4271/2012-01-1092, 10 pag., 2012.  
<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2012-01-1092/>.
- [KD11] Kirpalani, D. M., Suzuki, K., "Ethanol enrichment from ethanol-water mixtures using high frequency ultrasonic atomization", Ultrasonics sonochemistry, 18(5), pag. 1012-1017, 2011.
- [KO10] Kontin, S., Höfler, A., Koch, ş.a., "Heat and Mass Transfer accompanied by Crystallisation of single Particles containing Urea-water-solution", In 23rd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Brno, Czech Republic, 11 pag., 2010.
- [KR12] Kristie R., James F. C., ş.a., "The impact of the clean air act" The Journal of pediatrics, pag. 161(5), DOI:[10.1016/j.jpeds.2012.06.064](https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2012.06.064), pag. 781-786, 2012.  
[https://www.jpeds.com/article/S0022-3476\(12\)00752-4/fulltext](https://www.jpeds.com/article/S0022-3476(12)00752-4/fulltext).
- [KS14] Kentish, S., Feng, H., "Applications of power ultrasound in food processing", Annual review of food science and technology, 5, pag. 263-284, 2014.
- [LH19] Latha, H. S., Prakash, K. V., Veerangouda, M., ş.a., "A review on SCR system for NO<sub>x</sub> reduction in diesel engine", International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, 8(4), ISSN: 2319-7706, pag. 1553-1559, 2019.  
[https://www.researchgate.net/profile/Devanand-Maski/publication/332588087\\_A\\_Review\\_on\\_SCR\\_System\\_for\\_NOx\\_Reduction\\_in\\_Diesel\\_Engine/links/5ce4e85ba6fddcc9ddc4bed4/A-Review-on-SCR-System-for-NOx-Reduction-in-Diesel-Engine.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Devanand-Maski/publication/332588087_A_Review_on_SCR_System_for_NOx_Reduction_in_Diesel_Engine/links/5ce4e85ba6fddcc9ddc4bed4/A-Review-on-SCR-System-for-NOx-Reduction-in-Diesel-Engine.pdf).
- [LI20] Lieber, C., Koch, R., & Bauer, H. J. "Spray evaporation of urea–water solution: Experiments and modelling", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 116, 110108, 13 pag., 2020.
- [LP16] Larsson, P., Lennard, W., Dahlstrom, J., ş.a. "NO<sub>x</sub>-conversion and activation temperature of a SCR-catalyst whilst using a novel biomimetic flash-boiling AdBlue injector on a LD engine", SAE Technical Paper, ISSN: 0148-7191, Swedish, DOI:  
<https://DOI.org/10.4271/2016-01-2212>, 7 pag., 2016.
- [LU22] Lukas, D., Michael, M., Gert, B., ş.a., „Modelling of the NO<sub>x</sub> storage behaviour during cold start of modern zeolite SCR catalysts”, Automotive and Engine Technology, 7(1), pag. 81-96, 2022.  
<https://link.springer.com/article/10.1007/s41104-021-00099-w>
- [MA23] Majewski W. A., „Selective Catalytic Reduction”, DieselNet Technology Guide - Diesel Catalysts, 5 pag., 2023.[https://dieselnet.com/tech/cat\\_scr.php](https://dieselnet.com/tech/cat_scr.php)
- [MA73] Marrero, T. R., & Mason, E. A., "Correlation and prediction of gaseous diffusion coefficients", AIChE Journal, 19(3), pag. 498-503, 1973.
- [MC07] McCarthy J.E, Copeland C., Parker L., ş.a., [Clean Air Act: A Summary of the Act and its Major Requirements], Service CR, editor. 24 pag., 2007.  
<https://crsreports.congress.gov/product/pdf/RL/RL30853>
- [MI96] Mihai I., [Modelul fizico-matematic al motorului diesel alimentat cu adaos de apă], Institutul politehnic "GH ASACHI" Iași, 297 pag., 1996.



