

Procesul de ardere

(note de curs)

Cuprins

Cuprins	2
1.1 Generalități	3
1.2 Timpii de reacție.....	6
1.3 Constanta vitezei de reacție.....	7
1.4 Cinematica reacțiilor de ardere	8
1.5 Variația temperaturii unui volum adiabat în timpul unui proces de ardere	12
1.6 Aprinderea combustibililor	13
1.6.1 Compoziția aerului.....	14
1.6.2 Dozajul	16
1.6.3 Raportul aer-combustibil (AFR)	16
1.6.4 Raportul specific - equivalence ratio	21
1.6.5 Limitele de aprindere.....	25
1.7 Turbulența.....	26
1.7.1 Generalități	26
1.7.2 Scări de lungime.....	29
1.7.3 Scări de timp	31
1.7.4 Criterii de similitudine cu aplicație în combustie. Diagrama Borghi	32
1.8 Flacăra	36
1.8.1 Tipuri de flăcări	36
1.8.2 Temperatura flăcării	36
1.8.3 Viteza de ardere.....	39
1.8.4 Viteza laminară de ardere	39
1.8.5 Viteza turbulentă de ardere	41
1.8.6 Diametrul de stingere	44
Referințe bibliografice.....	48

1.1 Generalități

În ultimele mii de ani, focul a fost utilizat și controlat de către oameni fără ca niciun real progres să se înregistreze în procesul de ardere. În tot acest timp, căldura a fost obținută prin arderea lemnului, cărbunelui sau a altor combustibili. Toți combustibilii convenționali erau arși după cum aceștia ardeau în mod natural, iar pentru mărirea fluxului căldură, singura soluție era introducerea unei cantități mai mari de combustibil, intensificându-se în acest mod procesul de ardere.

Doar în ultima vreme s-a reușit performanța arderii combustibililor într-un timp mai scurt, ceea ce a dus la reducerea dimensiunilor-gabaritului instalațiilor de ardere, creșterea temperaturilor, etc..

Procesul de ardere este o reacție chimică de oxidare rapidă exotermă și însoțită de emisie de lumină, prin care anumite elemente din componența combustibilului se combină cu oxigenul din aer.

Procesele de ardere se pot clasifica:

- După compoziția produselor rezultate în urma arderii:
 - Ardere completă,
 - Ardere incompletă.
- În funcție de cantitatea de aer care ia parte la ardere:
 - Ardere teoretică: cantitatea de aer utilizată în procesul de ardere este cea minim necesară pentru ca arderea să fie completă,
 - Ardere cu exces de aer: cantitatea de aer care ia parte la ardere este mai mare decât cea minim necesară.
- După viteza de propagare a frontului de ardere:
 - Deflagrație: viteza este sub 30 m/s;
 - Detonație: viteza este între 30 și 200 m/s;
 - Explozie: viteza este peste 200 m/s.

După domeniul în care are loc:

- Ardere difuzivă: Viteza de ardere este determinată de viteza de difuzie a combustibilului în zona de reacție;
- Ardere cinetică: Viteza de ardere este determinată de viteza reacțiilor chimice.

Din punct de vedere chimic, procesul de ardere poate fi perfect sau imperfect, ultima situație caracterizând arderea incompletă.

Dacă, în urma arderii,

- tot carbonul din combustibil se regăsește în CO₂,
- hidrogenul participă integral la obținerea apei,
- iar sulful se oxidează rezultând SO₂,

iar în gazele de ardere nu se mai găsesc elemente care să mai poată întreține arderea, arderea este considerată completă.

În cazul în care arderea este completă, iar aerul utilizat a fost cel minim necesar, atunci arderea se numește stoechiometrică.

Reacția de ardere poate să fie:

- omogenă: când combustibilul și oxidantul se găsesc în aceeași stare (stare gazoasă),
- eterogenă: când combustibilul și oxidantul se găsesc în stări diferite.

În cazul reacției de ardere dintre un combustibil gazos și aer, reacția este una omogenă deoarece atât combustibilul cât și aerul sunt în stare gazoasă.

În cazul reacției de ardere dintre un combustibil lichid și aer, reacția este tot omogenă. Explicația este că, în cazul combustibililor lichizi reacția de ardere ridică dificultăți deosebit de mari, în timp s-a impus transformarea acestora în stare gazoasă înainte de a participa la ardere (Ex: în cazul motoarelor cu aprindere prin scânteie, benzina este introdusă în stare de vapori în cilindrul motorului, iar în cazul motoarelor cu aprindere prin compresie, motorina este pulverizată sub formă de particule de dimensiuni de ordinul micronilor).

În cazul reacției de ardere dintre un combustibil solid și aer, avem reacții atât omogene cât și eterogene. Aceasta deoarece materia volatilă arde în reacții omogene, iar carbonul în reacții eterogene.

Ca arderea să aibă loc și să fie completă, trebuie îndeplinite simultan următoarele condiții:

- asigurarea unei cantități suficiente de oxidant, precum și asigurarea amestecului omogen al combustibilului cu oxidantul;
- asigurarea unei temperaturi necesare aprinderii amestecului combustibil omogen;
- viteza de curgere a amestecului combustibil (combustibili lichizi și gazoși) trebuie să aibă o valoare cel puțin egală cu viteza frontului de flacără (pentru prevenirea returului de flacără), dar nu foarte mare (pentru prevenirea fenomenului de flacără suflată).

Dacă primele două condiții nu sunt îndeplinite decât parțial, elementele combustibile (carbonul, hidrogenul, sulful) nu se vor putea transforma prin ardere în totalitate în produșii finali de reacție. Avem în acest caz de-a face cu o ardere imperfectă.

Arderea incompletă poate să fie:

- chimic incompletă: dacă prin analiza gazelor de ardere se evidențiază prezența CO și H₂,
- mecanic incompletă: dacă produsele arderii conțin carbon ners de exemplu, sub formă de funingine.

Cu alte cuvinte, dacă în produsele finale ale arderii nu mai există energie chimică, arderea este completă.

În condițiile în care combustibilul este încălzit la temperaturi mari fără participare de oxigen, combustibilul va suferi totuși reacții sub acțiunea fenomenului de **piroliză**.

Piroliza este fenomenul de descompunere termochimică a unei substanțe organice la temperaturi înalte, fără participare de oxigen.

Exemple de aplicații unde este utilizată piroliza: transformarea cărbunelui în cocs, a lemnului în cărbune (mangal), hidrocarburi medii în hidrocarburi ușoare (benzina).

Exemplu proces de ardere:

Etapele aprinderii cu succes a unui foc de lemne:

- În partea de jos se așează lemne subțiri;
- Deasupra lor se pun lemne mai groase;
- Se aprinde o hârtie (ex: ziar) și se pune la baza lemnului subțiri;

Întrebare:

Care este motivul acestei succesiuni ?

Răspuns:

Dificultatea aprinderii în mod direct a lemnului mare este bine cunoscută față de cea a lemnului mai subțiri.

Datorită faptului că masa lemnului mai subțiri este mai mică decât a unui lemn gros, preîncălzirea și degajarea elementelor volatile din lemnul mai subțiri are loc mult mai rapid și cu un necesar de energie mai mic. După aprinderea lemnului mai subțiri, acestea vor furniza energia necesară pentru aprinderea lemnului mai gros.

Arderea combustibililor nu reprezintă o reacție simplă de oxidare sau reducere a elementelor combustibile (carbon, hidrogen și sulf). Ea constituie un fenomen foarte complex atât chimic, cât și fizic.

Fenomenul de ardere este complex din punct de vedere chimic datorită faptului că apar produși de reacție intermediari (radicali liberi) ca urmare a desfășurării unor reacții intermediare.

Fenomenul de ardere este complex din punct de vedere fizic, datorită faptului că până la finalul reacției de ardere, combustibilul va trece prin mai multe reacții succesive.

De exemplu, în cazul combustibililor solizi se pot aminti următoarele etape (Fig. 1):

- **Uscarea:** Sub acțiunea căldurii, umiditatea higroscopică se elimină rezultând combustibilul uscat. (Chiar și uscat în aer liber timp de doi ani lemnul mai conține 15% umiditate.) Acest proces se realizează în focarul cazanului sau în exteriorul acestuia, în mori de măcinat cărbune. Agentul încălzitor este constituit fie din gaze de ardere, fie din aerul preîncălzit necesar arderii. Aceasta este o etapă în care se consumă energie.
- **Degajarea compușilor volatili:** când temperatura depășește valoarea de 200°C, combustibilul solid începe să se descompună sub acțiunea căldurii (fenomenului de piroliză), rezultând elemente volatile.
- **Arderea compușilor volatili.** Elementele volatile rezultate vor reacționa cu oxigenul din aer în reacții exoterme. Aceste reacții de ardere formează corpul flăcării.
- **Arderea carbonului**, care are următoarele subetape:
 - Difuzia oxigenului spre suprafața combustibilului;
 - Absorbția oxigenului însoțită de combinarea carbonului din combustibil cu oxigenul din aerul de ardere;

- Arderea propriu-zisă, care se realizează lent fără flăcări (în această etapă se poate observa jarul de culoare roșie) iar emisia de energie este în domeniul infraroșu.

1.2 Timpii de reacție

În principiu, arderea cuprinde două procese importante:

- fenomenul fizic, reprezentat de amestecul intim al combustibilului cu oxidantul;
- fenomenul chimic, constând în reacția compușilor combustibilului cu oxidantul.

Fiecare din fenomenele de mai sus se desfășoară într-o anumită perioadă de timp, iar ponderea acestor timpi în procesul de ardere este deosebit de importantă pentru înțelegerea procesului de ardere.

Timpul de difuzie (τ_f) este caracteristic fenomenului fizic și depinde de regimul de curgere (laminar, turbulent), temperatură, concentrațiile relative ale substanțelor, valoarea mărimilor caracteristice termo-fizice (conductivitatea termică, difuzia termică, difuzia turbulentă).

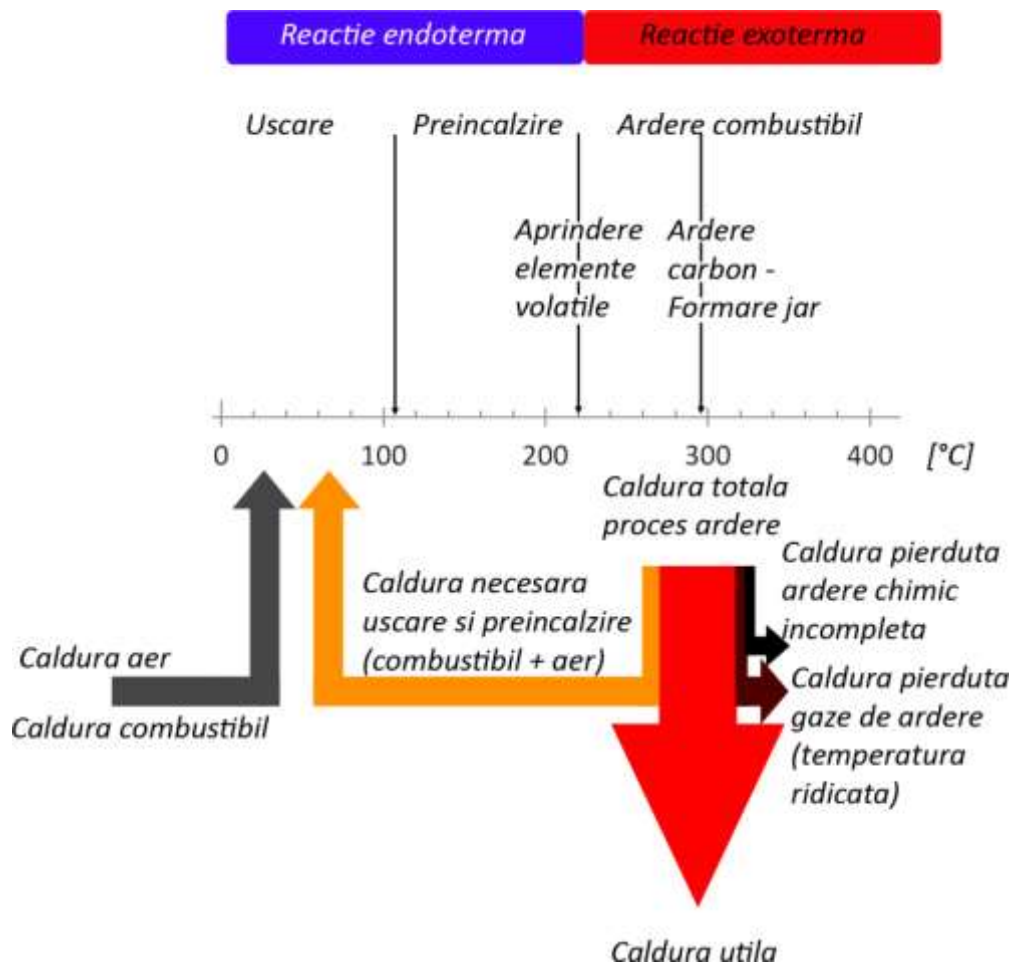


Fig. 1 Diagrama Sankey în cazul arderii combustibililor solizi (lemn, biomasă)

Timpul caracteristic desfășurării reacțiilor de ardere se numește timpul procesului cinetic (τ_c) și este asociat fenomenului chimic.

După locul unde se desfășoară procesul de amestec al combustibilului cu oxidantul, față de camera de ardere, timpul de difuzie poate fi:

- $\tau_f = 0$ - în cazul singular în care combustibilul se amestecă cu oxidantul într-un proces care precede faza de ardere, arderea se produce într-un amestec omogen (amestecul combustibil se realizează în afara camerei de ardere);
- $\tau_f \neq 0$ - în cazul în care în camera de ardere se introduc separat combustibilul și oxidantul astfel încât înainte de ardere, combustibilul și oxidantul trebuie să între în contact prin difuzie.

Dacă durata de timp necesară fenomenului chimic (τ_c) (reacția de ardere) este mult mai mare decât cea solicitată de fenomenul fizic (τ_f) (amestecul reactanților), arderea se numește cinetică. În acest caz, viteza de ardere crește mult cu creșterea temperaturii.

Dacă fenomenul fizic de difuzie durează mai mult decât cel chimic de ardere propriu-zisă, arderea se desfășoară în domeniul difuziv. În acest caz, viteza de ardere este influențată puțin de temperatură, însă crește substanțial odată cu creșterea vitezei aerului față de particulele de combustibil.

Din punct de vedere al instalațiilor de ardere, există mai multe posibilități de desfășurare a reacțiilor de ardere:

- amestecul combustibil se găsește în repaus, iar reacția de ardere se produce în tot volumul de amestec simultan în timpul τ_c ;
- amestecul combustibil se găsește în repaus, iar reacția de ardere se produce într-un punct, iar apoi continuă sub forma unui front de flacără care înaintează cu viteza de ardere (Frontul de flacără este de fapt marginea flăcării care se propagă prin amestecul combustibil);
- jet de amestec combustibil în care se stabilizează un front de flacără staționar ca poziție, pentru care viteza de ardere este egală cu viteza de înaintare a amestecului combustibil;
- jet de amestec combustibil în care se stabilizează un front de flacără ca urmare a unui aport de energie de aprindere, la care viteza de înaintare a amestecului este mai mare decât viteza normală de ardere.

Timpul total de ardere este egal cu:

$$\tau_T = \tau_f + \tau_c$$

După ponderea pe care o au timpii de difuzie și cinetic în procesul de ardere, procesul de ardere poate să fie:

- difuziv $\tau_f \gg \tau_c$;
- cinetic $\tau_f \ll \tau_c$;
- cinetico-difuziv $\tau_f \sim \tau_c$.

1.3 Constanta vitezei de reacție

Viteza de reacție exprimă variația concentrației reactanților sau produșilor de reacție în timp.

Viteza de reacție depinde de numeroși factori, cei mai importanți fiind concentrația reactanților și temperatura.

Constanta vitezei de reacție a fost stabilită de Arrhenius prin expresia:

$$k = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$$

$$A = C \cdot T^\alpha$$

unde: E este energia de activare,

R este constanta gazelor (8314 J/molK)

T este temperatura în K.

C este o constantă;

α variază între 0 și 1.

Ecuția Arrhenius este o relație simplă, dar exactă, pentru dependența de temperatură a constantei vitezei de reacție, și prin urmare, a vitezei reacției chimice. Această ecuație se stabilește empiric și poate fi folosită pentru a modela variația coeficienților de difuzie cu temperatura și multe alte procese/reacții induse termic.

O generalizare utilă susținută de ecuația Arrhenius este că, pentru multe reacții chimice comune la temperatura camerei, viteza de reacție se dublează pentru fiecare creștere cu 10°C a temperaturii.

Pentru determinarea vitezei de reacție se utilizează relația:

$$W = k \cdot p_{A_1}^{\alpha_1} \cdot p_{A_2}^{\alpha_2} \dots$$

unde p reprezintă presiunea parțială a fiecărui component.

Câteva exemple de reacții în funcție de constanta vitezei de reacție sunt prezentate în Tabel 1.

Tabel 1 Calculul constantei de reacție pentru câteva reacții caracteristice arderii

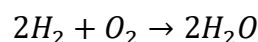
	Reacția de ardere	$k = A \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$
1	$O + H_2 \leftrightarrow OH + H$	$(0.4 \dots 3.4) \cdot 10^{13} \cdot e^{-\frac{9200}{RT}}$
2	$OH + CH_4 \leftrightarrow CH_3 + H_2O$	$1 \cdot 10^{14} \cdot e^{-\frac{8500}{RT}}$
3	$OH + H_2 \leftrightarrow H_2O + H$	$(2.1 \dots 18.9) \cdot 10^{13} \cdot e^{-\frac{5900}{RT}}$
4	$H + O_2 \leftrightarrow OH + O$	$2.14 \cdot 10^{14} \cdot e^{-\frac{16000}{RT}}$
5	$OH + CH_2O \leftrightarrow HCO + H_2O$	$5 \cdot 10^{15} \cdot e^{-\frac{13000}{RT}}$

1.4 Cinematica reacțiilor de ardere

Conform ecuației lui Arrhenius reiese că reacțiile chimice de oxidare într-un combustibil au loc chiar și la temperatura mediului ambiant. Astfel, la temperaturi joase, conform teoriei cinetice a reacțiilor chimice, arderea se produce foarte încet, astfel încât consumarea combustibilului este extrem de lentă.

În procesele practice ne interesează reacțiile de ardere rapide, la care degajarea căldurii este utilizabilă în diverse scopuri.

De exemplu, reacția de ardere a hidrogenului în prezența oxigenului se poate scrie sub forma de mai jos:



Chiar și în cazul foarte simplu al reacției de mai sus, desfășurarea reacției după ecuația de oxidare a hidrogenului este foarte puțin probabilă, deoarece aceasta presupune în permanență ciocniri

trimoleculare, întotdeauna în prezența unei energii de activare necesare. Acest caz presupune existența unor reacții lente care trebuie permanent activate, ceea ce ar contrazice realitatea.

Pentru ca o reacție chimică să se desfășoare este necesar ca particulele reactanților să se ciocnească și apoi ca ele să se combine. Nu orice ciocnire între particule duce la reacții chimice. Reacția chimică are loc doar atunci când, în cazul în care două particule se ciocnesc, una din ele are o energie mai mare decât media energiei moleculelor conținute în amestecul combustibil și anume energia minimă de activare (E).

Particulele care posedă energia minimă de activare se numesc particule activate, iar ciocnirile care duc la desfășurarea unei reacții chimice poartă numele de ciocniri eficiente.

Schema reală de desfășurare a procesului de ardere este reacția în lanț prin particule activate:

- radicali liberi: R* - atomi sau molecule cu valențe libere, foarte activi în recombinație;
- molecule activate: M* - molecule cu valențe satisfăcute, însă cu o încărcare energetică foarte mare, care le fac foarte active în recombinație.

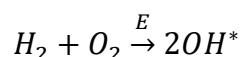
Mecanismul de înlănțuire cuprinde următoarele tipuri de reacții:

- reacții de inițiere, în care se creează particulele activate;
- reacții de continuare, în care o particulă activată va duce la crearea altei particule activate;
- reacții de ramificare, în care o particulă activată va duce la crearea mai multor particule activate;
- reacții de întrerupere, în care lanțul cinematic se întrerupe.

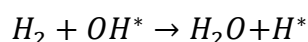
Mecanismul de reacție pentru "reacția simplă" a hidrogenului cu oxigenul are mai mult de 50 de reacții intermediare elementare, iar pentru cea a gazului metan cu oxigenul, ajunge la peste 450 de reacții intermediare elementare.

Mecanismul posibil pentru reacția de ardere a hidrogenului în prezența oxigenului poate să fie următorul (există mai multe posibilități de desfășurare a acestei reacții):

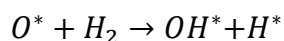
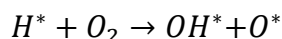
Reacția începe cu o **reacție de inițiere** în care energia de activare (E) este responsabilă de declanșarea reacției chimice. Această energie este introdusă din exterior (sursa de aprindere). În această reacție apar primii radicali liberi OH*. Energia acestor radicali liberi provine integral din efectul energetic al reacției, care este integral preluat de radicalii liberi.



Mai departe poate urma o **reacție de continuare**, în care se observă apariția unui radical nou H* cu o energie mai ridicată decât a radicalului liber OH*. Se observă de asemenea, faptul că pentru continuarea acestei reacții nu a mai fost nevoie de energia de activare, deoarece radicalul OH* a furnizat toată energia necesară. Toată energia radicalului inițial și a reacției se va regăsi în radicalul H*.

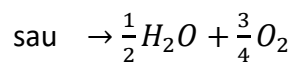
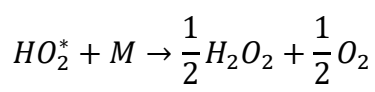
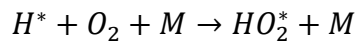


Poate urma o **reacție de ramificare**, în care un radical liber generează mai mulți radicali.

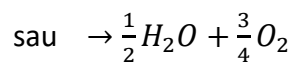
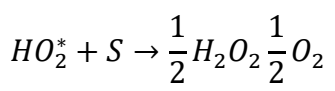
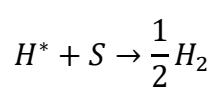


Reacția poate continua în acest fel ramificându-se exponențial, ceea ce conferă de altfel denumirea de reacție în lanț.

În continuare, pe măsură ce combustibilul se consumă, vor lua naștere produsele de ardere inerte (H₂O), care se alătură moleculelor inerte din reacția inițială (azot, aer în exces). Ca urmare, apar și se înmulțesc **reacțiile de întrerupere** a lanțurilor cinetice în molecule inerte, M.



Totodată, apar întreruperi în lanțul cinematic datorită ciocnirii particulelor activate cu zone capabile să absoarbă energia acestora (de exemplu: pereții focarului – S).



Schema cinematică a arderii după teoria reacției în lanț se poate transpune în Fig. 2.

Reacții mai complicate se desfășoară în cazul hidrocarburilor, unde datorită numărului și diversității mari de radicali liberi, mersul reacției chimice nu poate să fie unic. Ca regulă generală, se va avea în vedere că desfășurarea reacției se face preponderent cu radicali liberi foarte activi (de ex. H^{*}) în cazul desfășurării reacției de ardere la temperaturi ridicate și preponderent cu radicali de energie mică (de ex. OH^{*}, CH₃^{*}), în cazul în care reacția de ardere se desfășoară la temperaturi mai joase.

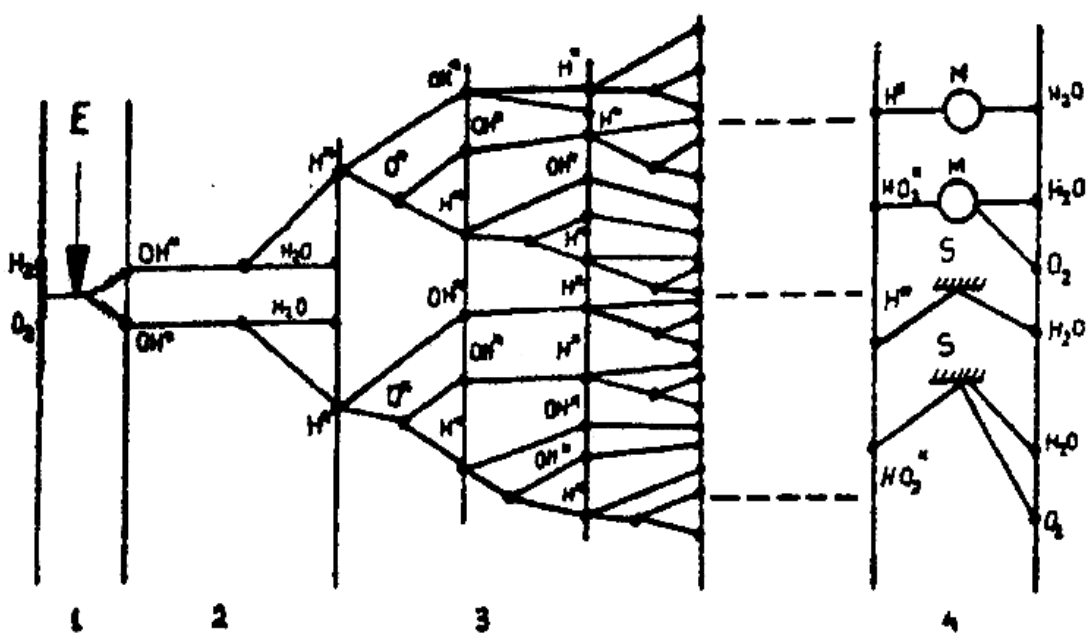
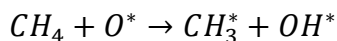
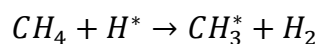
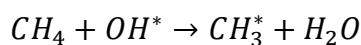


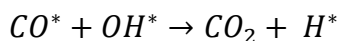
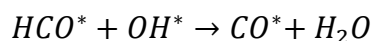
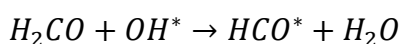
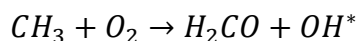
Fig. 2 Schema cinematică a arderii după teoria reacției în lanț [1]

Pentru metan, reacțiile cele mai importante sunt:

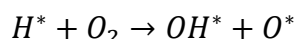
- formarea inițială a radicalului liber CH_3^* :



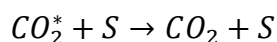
- reacții de continuare:



- reacții de ramificare:



- reacții de întrerupere:

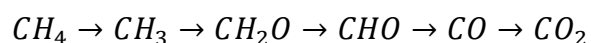


Reacțiile se continuă și se ramifică cu radicalii H^* și CO^* după schemele arătate anterior.

Se consideră în general, pentru simplificare, că în hidrocarburi reacțiile au loc în două trepte:

- treapta I : CO , H_2 , H_2O și H^* , O^* , OH^* , C_2^* , CH^* , etc,
- treapta II: CO_2 .

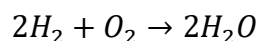
Schema cinematică standard simplificată a CH_4 decurge în felul următor:



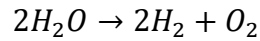
Reacția de disociere

Reacția de disociere este o reacție chimică reversibilă în care o substanță se descompune la temperaturi ridicate. După cum am mai amintit, procesul de ardere este un proces extrem de complex. Asta și datorită faptului că reacțiile care au loc în flacără nu au o singură direcție de desfășurare.

De exemplu, reacția:



se poate desfășura uneori, în anumite condiții, și în direcția:

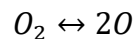
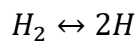
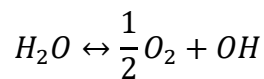
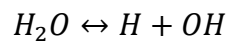
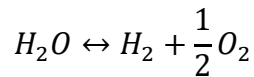
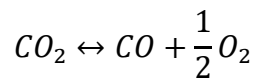


De regulă, reacțiile de disociere sunt reacții endoterme.

Pentru o instalație de ardere în care temperatura compușilor rezultați din ardere este sub 1250K, presupunerea conform căreia compușii de reacție regăsiți sunt doar CO₂, H₂O, N₂ și O₂, este corectă. Însă, de cele mai multe ori, în cele mai multe instalații de ardere temperatura atinsă fiind mai mare de 1250K, va apărea disocierea compușilor rezultați în urma arderii [2]. La temperaturi mai mari de 2000K influența disocierii în reacția de ardere va deveni dominantă afectând fluxul de căldură degajat prin arderea combustibilului.

Neluarea în considerare a reacției de disociere nu este corectă, și poate să ducă la erori mari, deoarece disocierea este un proces endoterm (are nevoie de căldură), ceea ce duce la o temperatură măsurată mai mică decât temperatura teoretică.

Producții stabili de ardere rezultați dintr-o reacție C-H-O pot să disocieze după oricare din reacțiile următoare, toate aceste reacții fiind endoterme, ceea ce va duce în final la scăderea temperaturii flăcării:



1.5 Variația temperaturii unui volum adiabat în timpul unui proces de ardere

Se presupune existența unui volum adiabat în care se regăsește la momentul inițial $\tau=0$, un amestec combustibil-oxidant la temperatura mediului ambiant T_0 . Temperatura nefiind nulă, viteza de reacție este și ea finită conform reacției lui Arrhenius.

$$w = A \cdot C^V \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$$

unde C^V reprezintă concentrația de combustibil.

În ansamblu, procesul de ardere se poate desfășura calitativ după exemplul din Fig. 3.

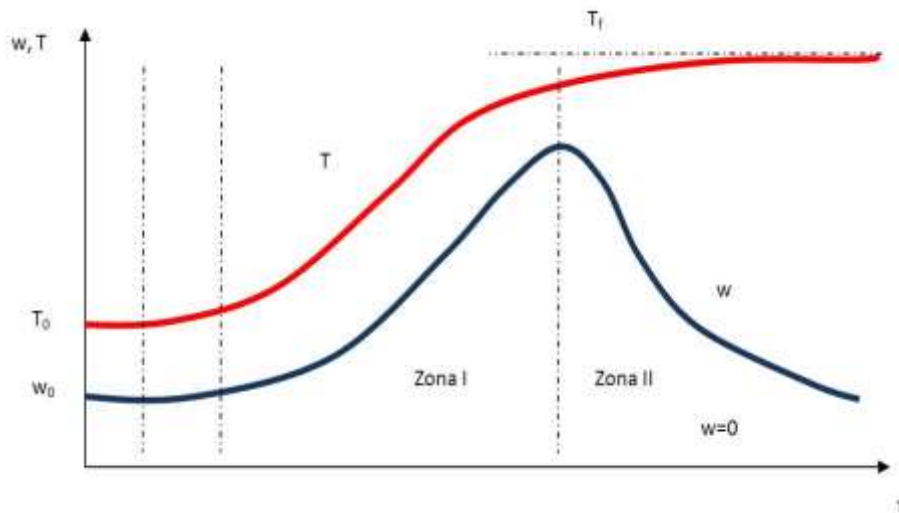


Fig. 3 Variația temperaturii și a vitezei de reacție într-un volum adiabat în cadrul unui proces de ardere.

Procesul începe cu o viteză de reacție foarte mică, ceea ce va duce la creșterea temperaturii deoarece nu sunt disipări de căldură, toată căldura generată în urma reacției încălzind gazele din acel volum.

Astfel, temperatura va crește și mai mult, ceea ce va duce la o mărire exponențială a vitezei de reacție.

Odată cu consumarea cantității de combustibil din volumul adiabat, datorită consumului de combustibil în reacțiile de ardere, concentrația acestuia va scădea atât de mult (în detrimentul creșterii concentrației de produși de ardere), încât numărul ciocnirilor cu molecule inerte să fie atât de mare, astfel încât viteza de reacție să scadă foarte mult. Variația temperaturii va fi din ce în ce mai redusă, temperatura va tinde spre temperatura finală T_f , care este de fapt temperatura de ardere a celui combustibil.

1.6 Aprinderea combustibililor

Referindu-ne la ecuația vitezei de reacție (ecuația lui Arrhenius), există trei cerințe care condiționează existența procesului de ardere. Arderea depinde de modul în care sistemul permite transformarea dintr-un amestec stabil într-un amestec combustibil, care reacționează rapid în cadrul unui proces de ardere.

Prima cerință este existența unei energii suficiente pentru a permite inițierea reacției de ardere. Această energie poate fi furnizată de către oricare din metodele următoare: scânteie electrică, aport de căldură, prin introducerea de radicali liberi.

Tendința unui carburant de a arde depinde de mai mulți factori: tipul de carburant, valoarea energiei de ardere, amestecul combustibil-oxidant, presiunea, viteza, turbulența, incinta de ardere (focarul).

Temperatura de aprindere spontană se definește ca temperatura peste care combustia, odată declanșată, se va menține și sub care arderea activă nu poate avea loc.

În cazul în care, căldura este transmisă departe suficient de rapid, temperatura poate fi redusă sub punctul de aprindere și arderea încetează.

Temperatura de aprindere a combustibilului variază în funcție de concentrația acestuia și se va reduce cu creșterea presiunii. Introducerea de oxigen suplimentar are un efect nesemnificativ

variației temperaturii de aprindere, ceea ce înseamnă că procesul de ardere este reglementat mai degrabă de expresia lui Arrhenius decât de concentrația de combustibil din amestecul carburant.

Tabel 2. Temperatura de autoaprindere pentru diferiți combustibili gazoși

Combustibil	Temperatura de autoaprindere [°C] [3]
Gaze naturale	482-632
Propan	493-604
Butan	482-538
Acetilena	305
Hidrogen	500
Amoniac	651
Monoxid de carbon	609
Etilena	490

Odată ce aprinderea este realizată, **a doua cerință** este ca arderea să aibă loc în continuare. Chiar dacă este realizat un amestec de combustibil și oxidant, aceasta nu înseamnă că acesta este în măsură să susțină arderea. Arderea poate fi susținută doar în condițiile în care căldura eliberată prin ardere este mai mare decât cea absorbită de mediul înconjurător.

Cerințele necesare pentru obținerea unei flăcări într-un amestec combustibil gaz / aer sunt:

- Cel puțin o parte din amestecul combustibil trebuie să aibă temperatura peste temperatura de aprindere spontană.
- În punctul de aprindere trebuie generată suficientă căldură pentru a încălzi straturile din jur la o temperatură mai mare decât temperatura de aprindere spontană.
- Trebuie ca flacăra să se propage prin amestecul combustibil, dar aceasta are loc doar dacă raportul de combustibil-oxidant este în anumite limite (limitele de inflamabilitate).
- O ultimă cerință este ca viteza de curgere a amestecului combustibil să fie cuprinsă între anumite limite specifice fiecărui amestec combustibil, pentru a evita fenomenele de flacăra suflată sau retur de flacăra.

1.6.1 Compoziția aerului

Atmosfera este masa gazoasă care înconjoară planeta noastră și este împărțită în straturi cu diferite densități ale gazelor.

Stratul cu cea mai mică grosime și aflat cel mai jos (la nivelul solului) este numit troposferă. Altitudinea până la care ajunge acest strat este de aproximativ 7 kilometri la poli și 17 kilometri la ecuator. În troposferă se găsește 80% din masa atmosferei și 99% din masa vaporilor de apă din atmosferă.

Compoziția aerului atmosferic uscat este prezentată în

Tabel 3. Cantitatea de vapori de apă din aer variază considerabil depinzând de vreme, climă și altitudine. Vaporii de apă ajung să reprezinte între 0.1% și 4% din masa troposferei.

Tabel 3. Compoziția aerului uscat

Element chimic	Simbol	Concentrație volumetrică [%]	Masă molară [kg/kmol]
Azot	N ₂	78.08	28.01
Oxigen	O ₂	20.95	32
Argon	Ar	0.93	39.95
Dioxid de carbon	CO ₂	0.038	44.01
Neon	Ne	0.018	20
Heliu	He	0.0005	4
Metan	CH ₄	0.00015	83.8
Kripton	Kr	0.00011	131.4
Hidrogen	H ₂	0.00005	2.02

Pentru calcule uzuale, valorile pentru compoziția aerului sunt prezentate în Tabel 4.

Tabel 4. Valorile uzuale pentru compoziția aerului

Element chimic	Concentrație volumetrică [%]	Concentrație masică [%]
Oxigen	21	23
Azot	79	77

Alte proprietăți legate de calculul viscozității dinamice pot fi urmărite în Tabel 5.

Tabel 5. Proprietăți legate de viscozitate gaze

Gaz	Temperatura T ₀ [K]	Viscozitatea dinamică μ_0 [$\mu\text{Pa s}$]	Constanta Sutherland C
Aer	291.15	18.27	120
Azot	300.55	17.81	111
Oxigen	292.25	20.18	127
Hidrogen	293.85	8.76	72
Heliu	273	19	79.4

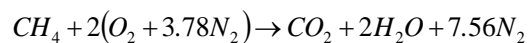
1.6.2 Dozajul

Se definește dozajul ca fiind raportul între volumul de combustibil și volumul de amestec:

$$\varphi = \frac{V_{comb}}{V_{am}}$$

Reacția stoichiometrică este reacția unică în care toți reactanții sunt consumați (combustibilul și oxidantul). Aceasta înseamnă că oxidantul prezent în reacție a fost de ajuns doar atât cât să se ardă complet combustibilul. Reacția stoichiometrică are loc atunci când reactanții sunt la dozaj stoichiometric.

Presupunând că în aerul din atmosfera există 20.9% oxigen și 79.1% azot în procente volumice, ecuația pentru o reacție stoichiometrică a amestecului combustibil de aer - gaz metan pentru un mol de gaz metan poate fi scrisă:



1.6.3 Raportul aer-combustibil (AFR)

O altă mărime utilizată frecvent în analiza proceselor de ardere pentru a cuantifica cantitățile de combustibil și aer este raportul aer-combustibil (AFR - Air to Fuel Ratio), definit ca raportul dintre masa de aer și masa de combustibil care participă în cadrul unui proces de ardere.

AFR este cel mai frecvent termen de referință utilizat pentru amestecurile combustibile în motoarele cu ardere internă, focare industriale, cazane. AFR poate fi definit atât în funcție de masă, în cazul în care ne raportăm la combustibili lichizi cât și de volum când combustibilul este unul gazos. În cazul în care oxidantul este aerul, relația se poate scrie:

$$AFR_m = \frac{\dot{m}_{aer}}{\dot{m}_{cb}} = \frac{m_{aer} [kg]}{m_{cb} [kg]}$$

$$AFR_v = \frac{\dot{V}_{aer}}{\dot{V}_{cb}} = \frac{V_{aer} [m^3]}{V_{cb} [m^3]}$$

În literatura internațională se utilizează și raportul combustibil/aer (Fuel to Air (oxidizer) Ratio - FAR).

Ca și în cazul AFR, FAR poate fi definit atât în funcție de masă în cazul în care ne raportăm la combustibili lichizi cât și de volum când combustibilul este unul gazos.

$$FAR_m = \frac{\dot{m}_{cb}}{\dot{m}_{aer}} = \frac{m_{cb}}{m_{aer}} = \frac{1}{AFR_m}$$

$$FAR_v = \frac{\dot{V}_{cb}}{\dot{V}_{aer}} = \frac{V_{cb}}{V_{aer}} = \frac{1}{AFR_v}$$

Exemplificare:

$$AFR = \frac{m_{aer}}{m_{comb}} \left[\frac{kg}{kg} \right]$$

Masa unei substanțe este raportată la numărul de kmoli prin intermediul masei molare utilizând relația de legătură:

$$m = N \cdot M [kg]$$

unde N reprezintă numărul de kmoli [kmol],

M este masa molară a substanței [kg/kmol].

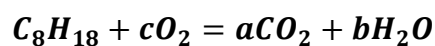
astfel încât raportul se poate exprima și în funcție de numărul de moli și de masa molară.



1. Arderea octanului (C₈H₁₈)

În continuare, este prezentat un exemplu de calcul pentru o hidrocarbură cu formula chimică C₈H₁₈. Aceasta este o hidrocarbură care se întâlnește în proporție ridicată în compoziția benzinei.

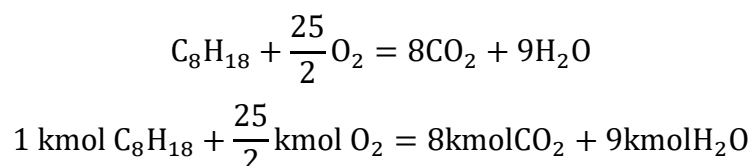
Formula chimică a octanului este C₈H₁₈, iar în urma arderii acestuia se degajă căldură, CO₂ și vapori de H₂O.



Prin aplicarea bilanțului masic se egalizează ecuația de ardere:

C:	8	—————→	a=8
H:	18	—————→	2b=18; b=9
O:	c=25/2	←————	2a+b=18+9=25

Ecuația de ardere a octanului devine astfel:



Se constată că pentru a oxida **1 kmol de C₈H₁₈** e nevoie de **25/2 kmol de O₂**.

Dar fiecare kmol de octan are o masă egală cu:

$$m_{C_8H_{18}} = N \cdot M_{C_8H_{18}} = 1 \cdot 114 = 114 \text{ kg}$$

unde masa molară a octanului este de:

$$M_{C_8H_{18}} = 12 \cdot 8 + 18 \cdot 1 = 114 \text{ kg/kmol}$$

Similar, un kmol de O₂ conține o masă egală cu:

$$m_{O_2} = N \cdot M_{O_2} = 1 \cdot 32 = 32 \text{ kg}$$

unde masa molară a oxigenului este de M_{O₂} = 32 kg/kmol

Se obține astfel cantitatea de oxigen necesară arderii unui kg de octan:

$$114 \text{ kg } C_8H_{18} \text{ sunt necesare } \frac{25 \cdot 32}{2} \text{ kg } O_2$$

$$1 \text{ kg } C_8H_{18} \text{ sunt necesare } \frac{25 \cdot 32}{2} \cdot \frac{1}{114} = 3.5 \text{ kg } O_2$$

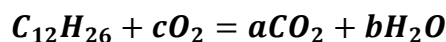
Deoarece participația masică a oxigenului în aer este de 23.2 % se obține cantitatea de aer necesară oxidării unei unități de cantitate de octan, și raportul AFR.

$$m_{aer} = \frac{3.5}{0.232} = 15.086 \text{ kg}$$

$$AFR = \frac{m_{aer}}{m_{C_8H_{18}}} = \frac{15.086}{1} = 15.086$$

2. Procesul de ardere pentru dodecan - C₁₂H₂₆

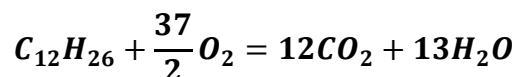
Formula chimică a dodecanului este C₁₂H₂₆ iar în urma arderii acestuia se degajă căldură, CO₂ și vapori de H₂O.



Prin aplicarea bilanțului masic se egalează ecuația de ardere:

C:	12	→	a=12
H:	26	→	2b=26; b=13
O:	c=37/2	←	2a+b=24+13=37

Ecuația de ardere a dodecanului devine astfel:



$$1 \text{ kmol } C_{12}H_{26} + \frac{37}{2} \text{ kmol } O_2 = 12 \text{ kmol } CO_2 + 13 \text{ kmol } H_2O$$

Se constată că pentru a oxida **1 kmol de C₁₂H₂₆** e nevoie de **37/2 kmol de O₂**.

Fiecare kmol de dodecan conține o masă egală cu:

$$m_{C_{12}H_{26}} = N \cdot M_{C_{12}H_{26}} = 1 \cdot 170 = 170 \text{ kg}$$

unde masa molară a dodecanului este de:

$$M_{C_{12}H_{26}} = 12 \cdot 12 + 26 \cdot 1 = 170 \text{ kg/kmol}$$

Se obține astfel cantitatea de oxigen necesară arderii unui kg de dodecan:

$$170 \text{ kg } C_{12}H_{26} \text{ sunt necesare } \frac{37 \cdot 32}{2} \text{ kg } O_2$$

$$1 \text{ kg } C_{12}H_{26} \text{ sunt necesare } \frac{37 \cdot 32}{2} \cdot \frac{1}{170} = 3.48 \text{ kg } O_2$$

Cantitatea de aer necesară oxidării unei unități de cantitate de combustibil, și raportul AFR pentru cazul dodecanului este:

$$m_{aer} = \frac{3.48}{0.232} = 15 \text{ kg}$$

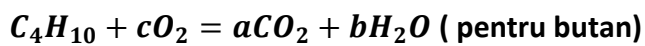
$$AFR = \frac{m_{aer}}{m_{C_{12}H_{26}}} = \frac{15}{1} = 15$$

3. Procesul de ardere pentru GPL auto

GPL-ul auto (Gaz Petrolifer Lichefiat) este un amestec de propan și butan în următoarele proporții: Butan, C_4H_{10} (90-99%) și Propan, C_3H_8 între (10-1%).

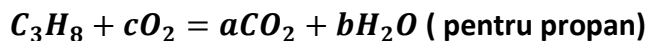
Considerând o cantitate de GPL cu compoziția masică: 90% C_4H_{10} și 10% C_3H_8 se va determina oxigenul necesar arderii și raportul AFR.

Se scriu mai întâi reacțiile de oxidare ale butanului și propanului, după cum urmează:



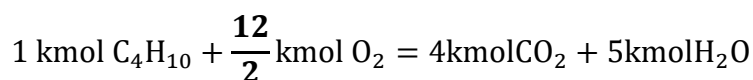
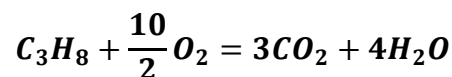
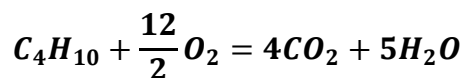
Prin aplicarea bilanțului masic se egalează ecuația de ardere:

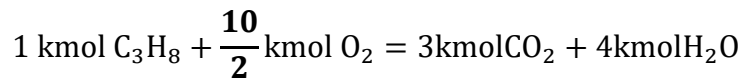
C:	4	→	a=4
H:	10	→	2b=10; b=5
O:	c=12/2	←	2a+b=8+5=12



C:	3	→	a=3
H:	8	→	2b=8; b=4
O:	c=10/2	←	2a+b=6+4=10

Ecuțiile de ardere ale celor doi componenți devin:





Pentru a oxida **1 kmol de C₄H₁₀** e nevoie de **12/2 kmol de O₂** iar pentru **C₃H₈ de 10/2 kmol de O₂**.

Cunoscând masele moleculare pentru butan și propan se determină masa acestor componente:

$$m_{C_4H_{10}} = N \cdot M_{C_4H_{10}} = 1 \cdot 58 = 58 \text{ kg}$$

$$m_{C_3H_8} = N \cdot M_{C_3H_8} = 1 \cdot 44 = 44 \text{ kg}$$

$$M_{C_4H_{10}} = 4 \cdot 12 + 10 \cdot 1 = 58 \text{ kg/kmol}; \quad M_{C_3H_8} = 3 \cdot 12 + 8 \cdot 1 = 44 \text{ kg/kmol}$$

Se obține astfel cantitatea de oxigen necesară arderii unui kg de butan sau propan:

$$58 \text{ kg } C_4H_{10} \text{ sunt necesare } \frac{12 \cdot 32}{2} \text{ kg } O_2$$

$$1 \text{ kg } C_4H_{10} \text{ sunt necesare } \frac{12 \cdot 32}{2} \cdot \frac{1}{58} = 3.31 \text{ kg } O_2$$

$$44 \text{ kg } C_3H_8 \text{ sunt necesare } \frac{10 \cdot 32}{2} \text{ kg } O_2$$

$$1 \text{ kg } C_3H_8 \text{ sunt necesare } \frac{10 \cdot 32}{2} \cdot \frac{1}{44} = 3.63 \text{ kg } O_2$$

Pentru un amestec GPL cu compoziția masică specificată (90% butan și 10% propan) se obține oxigenul necesar arderii astfel:

$$0.9 \cdot 3.31 + 0.1 \cdot 3.63 = 3.342 \text{ kg } O_2$$

Deoarece participația masică a oxigenului în aer este de 23.2 % se obține cantitatea de aer necesară oxidării unei unități de cantitate de GPL, și raportul AFR.

$$m_{aer} = \frac{3.342}{0.232} = 14.4 \text{ kg aer}$$

$$AFR = \frac{m_{aer}}{m_{GPL}} = \frac{14.4}{1} = 14.4$$

Tabel 6 Raportul aer combustibil pentru o serie de combustibili uzuali

Combustibil	Formula chimică	Ecuția de ardere	Oxigenul necesar [kgO ₂ /kg comb]	AFR [kg aer / kg comb]
Octan-Benzină	C₈H₁₈	$C_8H_{18} + \frac{25}{2}O_2 = 8CO_2 + 9H_2O$	3.5	15.086
Dodecan-Motorină	C₁₂ H₂₆	$C_{12}H_{26} + \frac{37}{2}O_2 = 12CO_2 + 13H_2O$	3.48	15
Butan	C₄H₁₀	$C_4H_{10} + \frac{12}{2}O_2 = 4CO_2 + 5H_2O$	3.31	14.26
Propan	C₃H₈	$C_3H_8 + \frac{10}{2}O_2 = 3CO_2 + 4H_2O$	3.63	15.64

1.6.4 Raportul specific - equivalence ratio

Unul din cei mai utilizați parametri care descrie amestecul carburant/oxidant în literatura internațională este raportul specific (equivalence ratio).

$$\Phi = \frac{FAR}{FAR_{st}} = \frac{\frac{V_{cb}}{V_{aer}}}{\frac{V_{cb}}{V_{aer\ st}}} = \frac{V_{aer\ st}}{V_{aer}} = \frac{1}{\lambda} = \frac{AFR_{st}}{AFR}$$

unde λ reprezintă coeficientul de exces de aer.

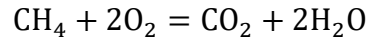
Se observă că pentru cazul în care dozajul actual este stoechiometric, valoarea raportului este 1. În condițiile în care există un exces de oxidant prezent în amestec, atunci amestecul combustibil este sărac $\Phi < 1$, iar în cazul în care există un exces de combustibil în amestec, atunci se spune despre amestec că este bogat $\Phi > 1$.

Mai sus s-a amintit că unul din cei mai utilizați parametri care descriu amestecul carburant/oxidant în literatura internațională este raportul specific (equivalence ratio).

Raportul specific este unul din cei mai utilizați parametri deoarece este independent de modul în care se efectuează calculul (masic sau volumic).

Pentru exemplificare se va calcula inițial valoarea FAR atât din punct de vedere masic, cât și volumic, la stoechiometrie.

Reacția chimică dintre gaz metan și oxigen se poate scrie:



În cazul de mai sus a fost scrisă reacția chimică dintre gaz metan și oxigen. Astfel, pentru cazul de mai sus, se observă că pentru a oxida un kmol de CH_4 avem nevoie de 2 kmol de O_2 .

Se cunoaște că

1 kmol de $\text{CH}_4 = 16\text{kg}$,

iar,

1 kmol de $\text{O}_2 = 32\text{kg}$,

în concluzie, pentru oxidarea a 1 kg de CH_4 avem nevoie de 4 kg de O_2 .

Cunoscându-se și faptul că proporția masică a oxigenului în aerul din atmosferă este 0,232 rezultă cantitatea de aer necesară pentru oxidarea a 1 kg de gaz metan la stoechiometrie:

$$m_{aer\ st} = \frac{m_{O_2\ st}}{0.232} = \frac{4}{0.232} = 17.24 \left[\frac{\text{kg aer}}{\text{kg gaz metan}} \right]$$

iar raportul AFR masic la stoechiometrie va avea aceeași valoare:

$$AFR_{m\ st} = \frac{m_{aer}}{m_{CH_4}} = \frac{17.24}{1} = 17.24 \left[\frac{\text{kg aer}}{\text{kg gaz metan}} \right]$$

Pentru calculul valorii raportului AFR în funcție de participația volumică, este nevoie de cunoașterea volumului de oxigen necesar oxidării a 1m^3 de CH_4 la stoechiometrie:

$$V_{O_2\ st} = \frac{N_{O_2}}{N_{CH_4}} = \frac{2}{1} = 2 \left[\frac{\text{m}^3 \text{ oxigen}}{\text{m}^3 \text{ gaz metan}} \right]$$

Cunoscându-se și faptul că proporția volumică a oxigenului în aerul din atmosferă este 0,21 rezultă cantitatea de aer necesară pentru oxidarea a 1m^3 de gaz metan, este:

$$V_{aer\ st} = \frac{V_{O_2\ st}}{0.21} = \frac{2}{0.21} = 9.52 \left[\frac{\text{m}^3 \text{ aer}}{\text{m}^3 \text{ gaz metan}} \right]$$

valoare care este egală și AFR_v:

$$AFR_{v\ st} = \frac{V_{aer\ st}}{V_{CH_4}} = \frac{9.52}{1} = 9.52 \left[\frac{\text{m}^3 \text{ aer}}{\text{m}^3 \text{ gaz metan}} \right]$$

Se poate observa o diferență mare între valoarea calculată a AFR în funcție de participația masică față de cea volumică.

$$17.24 \neq 9.52$$

Pentru arderea cât mai completă a unui combustibil se introduce o cantitate mai mare de aer decât cea minim necesară, ceea ce face ca arderea să se desfășoare cu exces de aer.

Exemplu de calcul pentru raportul specific:

Să se calculeze valoarea raportului specific (equivalence ratio) atât din punct de vedere al participației masice, cât și volumice pentru cazul unei reacții de ardere între gaz metan și aer, cu o valoare a excesului de aer $\lambda=1.1$.

- **Calcul raport specific din punct de vedere al participației volumice:**

$$V_{aer} = V_{aer\ st} \cdot \lambda = 9.52 \cdot 1.1 = 10.472 \left[\frac{\text{m}^3 \text{ aer}}{\text{m}^3 \text{ gaz metan}} \right]$$

Valoarea AFR_v va fi:

$$AFR_v = \frac{V_{aer}}{V_{CH_4}} = \frac{10.472}{1} = 10.472 \left[\frac{\text{m}^3 \text{ aer}}{\text{m}^3 \text{ gaz metan}} \right]$$

Iar valoarea raportului specific din punct de vedere volumic va fi egală cu raportul dintre:

$$\Phi_v = \frac{AFR_{v\ st}}{AFR_v} = \frac{9.52}{10.472} = \frac{1}{\lambda} = 0.909$$

- **Calcul raport specific din punct de vedere al participației masice:**

Densitatea aerului în condiții normale se poate determina din ecuația de stare pentru gazul perfect:

$$\rho_{aer} = \frac{P}{R_{aer}T} = \frac{101325}{287 \cdot 273.15} = 1.29249 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Masa de aer care participă în reacția de ardere este egală cu:

$$m_{aer} = V_{aer} \cdot \rho_{aer} = 10.472 \cdot 1.29249 = 13.5349 \text{ [kg aer]}$$

Densitatea metanului în condiții normale se poate determina tot din ecuația de stare pentru gazul perfect:

$$\rho_{CH_4} = \frac{P}{R_{CH_4}T} = \frac{101325}{519.656 \cdot 273.15} = 0.7138 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Masa de gaz metan care participă în reacția de ardere este egală cu:

$$m_{CH_4} = V_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} = 1 \cdot 0.7138 = 0.7138 \text{ [kg metan]}$$

În aceste condiții, valoare AFR din punct de vedere al participației masice este egală cu:

$$AFR_m = \frac{m_{aer}}{m_{CH_4}} = \frac{13.5349}{0.7138} = 18.96087 \left[\frac{\text{kg aer}}{\text{kg gaz metan}} \right]$$

Iar valoarea raportului specific din punct de vedere masic va fi egală cu raportul dintre:

$$\Phi_m = \frac{AFR_{m\ st}}{AFR_m} = \frac{17.24}{18.96087} = \frac{1}{\lambda} = 0.909$$

- **Concluzii:**

Este interesant de observat că valorile AFR sunt diferite pentru același caz dacă sunt calculate din punct de vedere al participației masice sau volumice:

$$AFR_m = 18.96087 \neq 10.472 = AFR_v$$

Dar valoarea raportului specific (equivalence ratio), rămâne neschimbată indiferent de modul în care este efectuat calculul:

$$\Phi_m = \Phi_v = \frac{1}{\lambda} = 0.909$$

Acesta este cel mai mare avantaj al utilizării raportului specific - equivalence ratio, și anume faptul că valoarea sa nu depinde de modul în care a fost calculat raportul AFR, din punct de vedere al participației masice sau volumice.

Chiar dacă arderea stoichiometrică mai este denumită ardere ideală, aceasta însă se face doar din considerente care țin de reacția chimică. Arderea ideală presupune că înainte de arzător avem doar reactanții (combustibil și oxidant), iar după ce reacția de ardere a avut loc, în gazele de ardere nu vom mai regăsi nicio urmă de combustibil sau oxidant, ci doar produși de reacție.

În practică, s-a observat că o putere mai mare se obține de regulă în cazul unui amestec bogat, aceasta ducând la o ardere incompletă atât chimic cât și mecanic a combustibilului, în gazele de ardere regăsindu-se o parte din combustibilul nears.

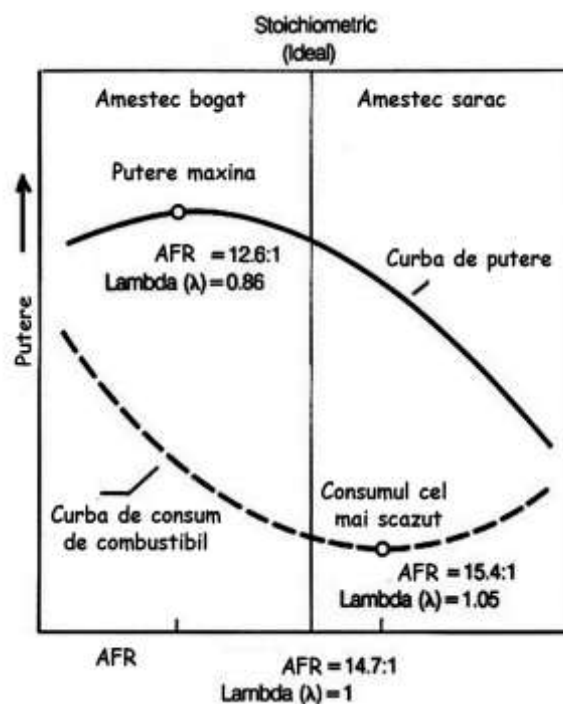


Fig. 4 Evoluția puterii obținute în urma arderii în funcție de excesul de aer pentru etilenă (după [4])

De asemenea, s-a observat că o economie mai mare de combustibil se poate obține în cazul în care amestecul este sărac.

De exemplu, în cazul etilenei (C_2H_4), poate fi urmărită evoluția consumului de combustibil în funcție de puterea obținută prin arderea combustibilului (Fig. 4).

1.6.5 Limitele de aprindere

Dacă se pun în comun o cantitate mică de combustibil gazos la o cantitate mare de aer, se va observa că aceasta nu se va aprinde. Dacă se va adăuga combustibil la amestecul creat, se va observa că la un moment dat amestecul devine inflamabil. Aceasta este denumită **limita inferioară de aprindere** (lower flammability limit - LFL) și reprezintă cea mai mică concentrație de combustibil în amestec cu oxidantul care poate susține arderea (Fig. 5).

Dacă se pun în comun o cantitate mare de combustibil gazos cu o cantitate mică de aer, se va observa că aceasta nu se va aprinde. Dacă se va adăuga aer la amestecul creat se va observa că la un moment dat amestecul devine inflamabil. Aceasta este denumită **limita superioară de aprindere** (upper flammability limit - UFL) și reprezintă cea mai mare concentrație de combustibil în amestec cu oxidantul care poate susține arderea (Fig. 5).



Fig. 5 Limitele de aprindere

Intervalul de inflamabilitate depinde de:

- Temperatura de aprindere,
- Căldura de ardere inferioară a combustibilului,
- Căldura specifică a gazelor,
- Volumele relative ale gazelor diluate și reactanților.

Acestea depind, de asemenea, de:

- Natura chimică a gazului,
- Direcția de propagare - în jos sau în sus (convecția naturală este în sus),
- Mărimea și forma de vas,
- Temperatura și presiunea.

Domeniul de inflamabilitate va fi mai mare în cazul în care:

- Direcția de propagare este în sus,
- Diametrul vasului este mai mare (pierderi mai mici de căldură prin pereți),
- Temperatura sau presiunea este ridicată.

Intervalul în care un amestec combustibil se aprinde devine mai larg odată cu creșterea temperaturii amestecului carburant. De asemenea, și creșterea presiunii poate duce la lărgirea acestui interval.

Pentru unele amestecuri combustibile ca hidrogen+oxigen sau acetilena+oxigen, există o regiune între limitele de aprindere unde propagarea normală a flăcării este înlocuită de detonație.

Tabel 7. Limitele de aprindere pentru diferite combinații de reactanți

Reactanți	Limitele de aprindere	
	φ_{inf}	φ_{sup}
H ₂ + O ₂	4.0	94
CO + O ₂	15.5	94
H ₂ + aer	4.0	75
CO + aer	12.5	74
CH ₄ + aer	5.3	14.9
C ₂ H ₂ + aer	2.5	81
C ₂ H ₄ + aer	3.1	32
C ₂ H ₆ + aer	3.1	15
C ₂ H ₈ + aer	2.2	9.5
C ₃ H ₈ + aer	2.5	9.6
n-C ₄ H ₁₀ + aer	1.9	8.5
C ₆ H ₆ + aer	1.5	7.5
C ₂ H ₃ OH + aer	3.0	80

1.7 Turbulența

1.7.1 Generalități

În curgerea laminară straturile adiacente de fluid trec unul pe lângă celalalt într-o manieră ordonată și lentă. Singura posibilitate de amestec este prin difuzie moleculară.

Conceptul de turbulență a fost introdus de George Gabriel Stokes [5] în 1851, dar tranziția de la un regim de curgere laminar la unul turbulent a fost descrisă pentru prima dată de Osborne Reynolds [6] în 1883, prin vizualizarea unui fir de lichid colorat.

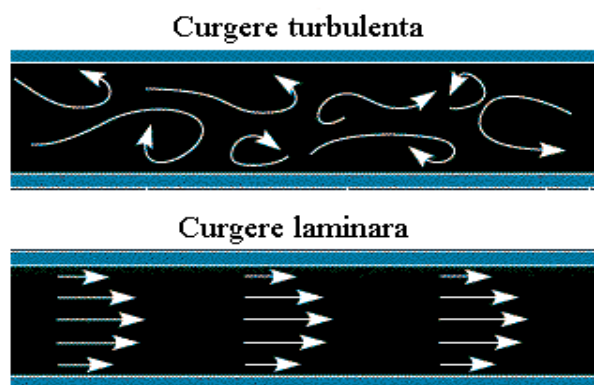


Fig. 6 Reprezentarea schematică comparativă între curgerea laminară și curgerea turbulentă [7]

Procesul de curgere este important atât în tehnică cât și în natură, majoritatea curgerilor fiind de natură turbulentă. Turbulența este dominantă în aproape toate aplicațiile ingineresti care implică curgere.

Turbulența este dependentă de timp și puternic neliniară, fiind un fenomen haotic. Studii detaliate au relevat faptul că curgerile turbulente conțin structuri definite spațial care se dezvoltă în timp – acestea se întâlnesc sub numele de vârtejuri (turbioane). Proprietățile dinamice și geometrice ale vârtejurilor mari sunt apropiate de proprietățile câmpului mediu de curgere. În medie, lungimea vârtejurilor mari este definită ca o fracțiune a lungimii caracteristice geometrice.

De exemplu, pentru cazul unei conducte, lungimea caracteristică este diametrul conductei (în cazul altor forme geometrice lungimea caracteristică este diametrul hidraulic).

De asemenea, aceste vârtejuri au și o viteză caracteristică definită în funcție de viteza medie. Aceste scări, împreună cu viscozitatea cinematică a fluidului, definesc criteriul de similitudine Reynolds, numit așa după Osborne Reynolds. Numărul Reynolds este definit ca fiind egal cu raportul dintre forțele inerțiale și cele vâscoase din curgere:

$$Re = \rho \cdot \frac{u \cdot L_t}{\mu} = \frac{u \cdot L_t}{\nu}$$

unde u este viteza caracteristică,
 L_t este lungimea caracteristică (diametrul în cazul conductelor),
 ν reprezintă viscozitatea cinematică,
 μ reprezintă viscozitatea dinamică.

La numere Reynolds mici, mișcarea este laminară, în cazul curgerii într-o conductă liniile de curent fiind paralele cu axa conductei. La depășirea unei valori critice a numărului Reynolds (~2300), mișcarea devine una local nestaționară, rămânând totuși organizată (regim tranzitoriu) (Fig. 7).

La curgerea prin conducte se consideră un regim complet turbulent la valori ale numărului Reynolds mai mari de 10000.

Lewis Fry Richardson, a introdus ideea că curgerea turbulentă este formată din vârtejuri de diferite mărimi [8] anticipând teoria din 1941 a lui Kolmogorov:

"Big whirls have little whirls that feed on their velocity,
and little whirls have lesser whirls and so on to viscosity." [8]

("Vârtejurile mari au vârtejuri mai mici, ce se hrănesc din viteza lor,
Vârtejurile mici au vârtejuri și mai mici, și tot așa până la viscozitate").

Mărimea turbioanelor care compun curgerea turbulentă este definită de scări caracteristice de lungime, de viteză și de timp. Vârtejurile de o anumită talie sunt instabile și sub efectul forfecării se întind generând vârtejuri mai mici, iar energia cinetică a vârtejurii inițiale va fi transferată vârtejurilor mai mici care se vor forma din acesta. Aceste vârtejuri mici vor trece prin același proces, dând naștere unor vârtejuri și mai mici care vor prelua energia vârtejurilor inițiale.

Pe această cale, energia cinetică este transportată de la scări mari din curgere, către scările mici până când mărimea acestora este suficient de mică pentru ca viscozitatea fluidului să provoace disiparea turbulenței, crescând în acest mod energia internă a fluidului.

Kolmogorov, în teoria sa spune că pentru numere Reynolds mari, scările mici ale curgerii turbulente sunt din punct de vedere statistic, izotrope.

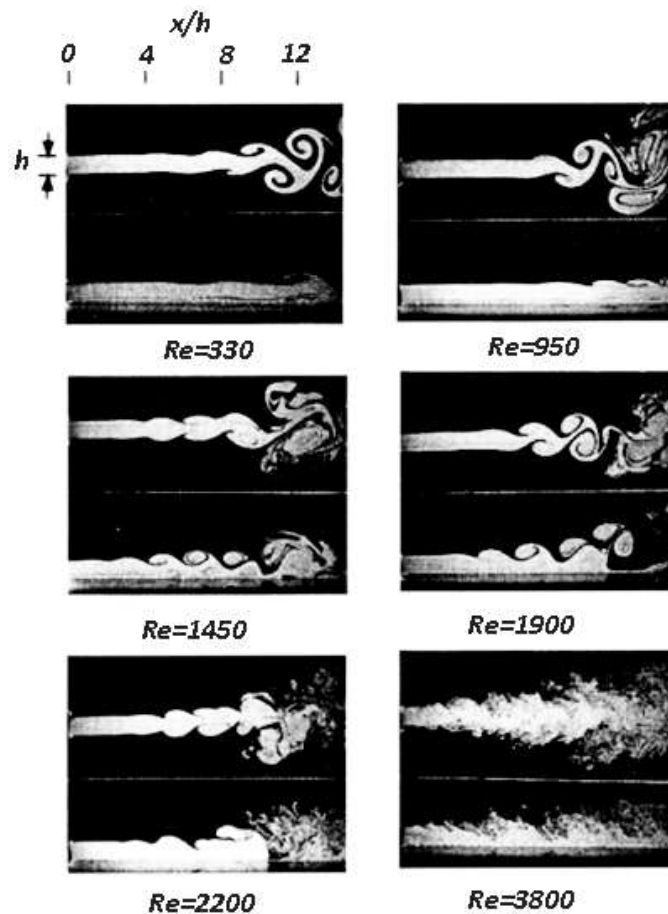


Fig. 7 Vizualizări de jeturi libere (sus) și curgeri tip jet pe lângă perete (jos) la diferite numere Reynolds [9]

În general, scările mari nu sunt izotrope, de vreme ce ele se identifică printr-o serie de trăsături geometrice. Ideea lui Kolmogorov a fost că în cascada energetică a lui Richardson, informația referitoare la geometria și direcția vârtejurilor este pierdută pe măsură ce scara este redusă, în acest fel, din punct de vedere statistic, scările mici au un caracter universal: sunt la fel pentru toate curgerile turbulente când numărul Reynolds este suficient de mare.

Cea mai mică scară de lungime care poate fi atinsă în curgere - scara Kolmogorov - corespunde echilibrului dintre forțele de inerție datorate turbulenței și forțele de disipare vâscoase la nivel molecular.

Este foarte dificil să se dea o definiție precisă turbulenței [10], chiar dacă fenomenul în sine este observabil și foarte ușor de reprodus: fumul dintr-un coș de fum sau de la o țigară sau dâra din spatele unei ambarcațiuni pe apă.

Se poate face însă o listă cu câteva din caracteristicile curgerii turbulente:

- Turbulența nu este o particularitate a unui fluid ci a curgerii fluidelor. Dinamica turbulenței este aceeași în aproape toate fluidele, chiar dacă sunt în stare lichidă sau gazoasă; caracteristicile majore ale curgerii turbulente nu sunt controlate de către proprietățile moleculare ale fluidului în care apare turbulența;
- Fluctuațiile parametrilor sunt tridimensionale. Turbulența este rotațională și tridimensională. Ea este caracterizată de niveluri înalte de fluctuații turbionare. Din acest motiv, dinamica vârtejurilor joacă un rol esențial în descrierea curgerii turbulente;
- Turbulența este un fenomen difuziv. Difuzivitatea turbulenței determină omogenizarea rapidă a unui amestec în general (și a celui combustibil în particular), precum și transferul

impulsului și al energiei. Difuzivitatea este un fenomen foarte important în curgerea turbulentă și este responsabil de întârzierea separării stratului limită, amplificarea schimbului de căldură;

- Turbulența se produce la numere Reynolds mari. De cele mai multe ori, turbulența pornește ca o instabilitate a curgerii laminare dacă numărul Reynolds crește peste o anumită valoare. Instabilitatea este funcție de interacțiunea dintre termenul care reprezintă viscozitatea fluidului și cel inerțial neliniar în ecuația mișcării;
- Turbulența este un fenomen disipativ. Curgerea turbulentă este întotdeauna disipativă. Fluctuațiile vitezei produc lucru mecanic de deformare care mărește energia internă a fluidului cu prețul scăderii energiei cinetice. În consecință, turbulența are nevoie de o sursă continuă de energie, pentru a se întreține;
- Turbulența este un fenomen macroscopic. Turbulența este un fenomen care aparține mecanicii mediilor continue, guvernat de ecuațiile mecanicii fluidelor. Chiar și cele mai mici scări care apar în curgerea turbulentă sunt mult mai mari decât liberul parcurs molecular din teoria cinetico-moleculară;
- Turbulența este un fenomen neregulat. Neregularitatea este reflectată de interacțiunile structurilor turbionare cu vitezele de forfecare. Efectul esențial al neregularității constă în imposibilitatea predicției curgerilor turbulente pe intervale mari de timp. Acest fapt forțează abordări de tip statistic, care vor fi discutate mai pe larg în capitolul dedicat modelării matematice a curgerilor.

1.7.2 Scări de lungime

Scările de lungime relevante pentru interacțiunile fizice și chimice sunt:

L	- macroscara;
l_l	- macroscara Taylor;
l_λ	- microscara Taylor;
l_K	- microscara Kolmogorov;
l_c	- microscara pentru reacții chimice;
δ_L	- grosimea frontului de flacără laminar;
δ_T	- grosimea frontului de flacără turbulent.

Toate aceste scări de lungime din cascada energetică nu pot fi controlate și sunt puternic nesimetrice. Cu toate acestea, în funcție de scara de lungime, vârtejurile de dimensiunea acestor scări de lungime pot fi împărțite în trei categorii [11].

Scările de lungime integrală cuprind vârtejurile cu cele mai mari niveluri energetice.

Aceste vârtejuri obțin energia direct din curgerea medie precum și de la alte vârtejuri de aceeași scară de lungime. Astfel, aceste vârtejuri sunt vârtejurile care acumulează energie și care conțin aproape toată energia din curgere.

Scările integrale au fluctuații mari de viteză la frecvență mică, ceea ce implică faptul că acestea sunt anizotrope.

Lungimea maximă a acestor scări este constrânsă de dimensiunea domeniului în care are loc curgerea. De exemplu, scara de lungime integrală a curgerii printr-o conductă este egală cu diametrul conductei. În cazul de turbulențelor atmosferice, această lungime poate ajunge până la ordinul mai multor sute de kilometri.

Macroscara, L , este cel mai mare diametru posibil pentru un vârtej (ex: diametrul conductei prin care curge fluidul). Fiind de mărimea spațiului în care se găsește fluidul, nu este o măsură a turbulenței, ci a curgerii laminare.

Cea mai mare scară a turbulenței este macrosca Taylor, l_t . Aceasta este o mărime a celor mai mari neregularități și a celor mai mari turbioane din curgere.

Microscara Kolmogorov, l_k , este cea mai mică scară de lungime turbulentă. Reprezintă scara la care disiparea energiei cinetice turbulente apare către energia internă a fluidului.

Aceste cele mai mici scări din curgere au o frecvență foarte ridicată, ceea ce implică faptul că turbulența asociată acestor scări de lungime are un caracter local izotrop și omogen.

Interacțiunile moleculare sunt importante și nu mai pot fi neglijate la această scară. Această scară este legată de energia de disipare prin relația:

$$l_k \approx \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}}$$

În teoria sa, Kolmogorov a introdus ipoteza că pentru numere Reynolds suficient de mari, scările mici sunt universale și unic determinate de către viscozitate și rata de disipație turbulentă, iar un număr Reynolds definit de scările disipative are valoare unitară.

Legătura dintre energia de disipare și energia cinetică turbulentă pe unitate de masă, ke_{turb} , este dată de relația:

$$\varepsilon = \frac{\partial(ke_{turb})}{\partial t}$$

Microscările Taylor reprezintă de fapt scările de lungime intermediare dintre cele mai mari și cele mai mici scări din curgere.

Microscările Taylor nu sunt scări disipative energetice, dar ele au un rol în transferul energiei de la scările energetice mari la acelea mai mici.

Existența și utilizarea microscărilor Taylor nu este luată în considerare în anumite cercuri științifice, considerând că cascada energetică este formată doar din cele mai mari și cele mai mici scări de lungime, cele mai mari fiind de dimensiunea domeniului investigat, iar cele mai mici conținând substratul vâscos și zona inerțială (aceste aspecte vor fi continuate în capitolul dedicat simulării numerice de tip CFD).

Cu toate acestea, microscările Taylor sunt utilizate pentru descrierea turbulenței într-un mod mai convenabil, având în vedere faptul că aceste scări de lungime joacă un rol dominant în transferul de energie și impuls între scările cele mai mari și cele mai mici de lungime.

Inițial, macrosca Taylor, l_t , a fost concepută pentru găsirea celor mai mici vârtejuri din curgere, dar ea definește de fapt mărimea medie a vârtejurilor dintr-o curgere. Ea reprezintă distanța maximă dintre două puncte între care mai există o corelație între vitezele fluctuante.

Cea mai mică scară de lungime, l_c , este macrosca pentru reacții chimice la care reacțiile chimice pot să apară fără să fie influențate de către turbulență.

Această scară este mai mică decât cel mai mic vârtej și nu este afectată de turbulența din curgere.

Grosimea frontului de flacără nu este o scară clasică de lungime. Cu toate acestea, este o măsură a mărimii zonei de reacție. Grosimile fronturilor de flacără laminar și turbulent sunt diferențiate după cum urmează:

Grosimea frontului de flacără laminar este funcție de reacția chimică și de viteza flăcării, S_L :

$$\delta_L \approx \frac{a}{S_L}$$

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

unde λ reprezintă conductivitatea termică,
 ρ este densitatea,
 c reprezintă căldura specifică a amestecului combustibil.

Grosimea frontului de flacără turbulent depinde în cea mai mare măsură de difuzia turbulentă. Utilizând metoda gradientului maxim, grosimea frontului de flacără poate fi obținută în funcție de densitate:

$$\delta_T = \frac{\rho_a \cdot \rho_b}{\left(\frac{d\rho}{dx}\right)_{\max}}$$

unde ρ_a reprezintă densitatea amestecului combustibil nears;
 ρ_b reprezintă densitatea gazelor de ardere.

1.7.3 Scări de timp

Evenimentele fizice și chimice pot să apară la diferite scări de timp și la diferite intervale de timp.

După cum se poate observa din Fig. 8, există un interval în care evenimentele fizice (ex: curgerea) pot afecta desfășurarea reacțiilor chimice. Scările de timp turbulente cele mai uzuale sunt definite în relație cu cele mai mari, respectiv, mai mici, scări de lungime.

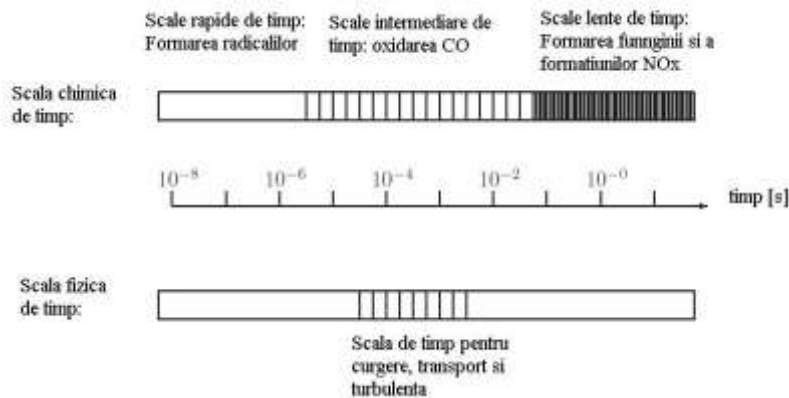


Fig. 8 Scări de timp chimice și fizice

Timpul *macroscării Taylor* (timpul scării integrale) este aproximativ egal cu:

$$t_I \approx \frac{l_I}{u'}$$

unde $u' = \sqrt{\frac{1}{2} \overline{u_i'^2}}$.

Timpul scării Kolmogorov este definit ca fiind funcție de viscozitatea cinematică moleculară și de rata de disipare.

$$t_K = \sqrt{\frac{\nu}{\varepsilon}}.$$

Scara de lungime Kolmogorov este legată de viscozitatea cinematică prin relația:

$$l_K = \sqrt[1/4]{\frac{\nu^3}{\varepsilon}},$$

și:

$$u_K = \frac{l_K}{t_K} = \sqrt[1/4]{\nu \varepsilon}.$$

Timpul scării chimice este funcție de grosimea frontului de flacără și se aproximează cu relația:

$$t_c \approx \frac{\delta_L}{S_L}.$$

1.7.4 Criterii de similitudine cu aplicație în combustie. Diagrama Borghi

Scările de lungime și timp aplicate în combustie duc la împărțirea domeniului combustiei în mai multe zone cu ajutorul a trei criterii de similitudine (numere adimensionale), și anume: Reynolds, Karlovitz și Damköhler.

Trei criterii de similitudine bazate pe numărul Reynolds pot fi definite în funcție de lungimea scării turbulente.

Numărul Reynolds al *macroscării Taylor*:

$$Re_{l_I} = u'_{rms} \frac{l_I}{\nu}.$$

Numărul Reynolds al *microscării Taylor*:

$$Re_{l_\lambda} = u'_{rms} \frac{l_\lambda}{\nu}.$$

Numărul Reynolds al scării *Kolmogorov*:

$$Re_{l_K} = u'_{rms} \frac{l_K}{\nu}.$$

Cele trei scări de lungimi turbulente se pot scrie în funcție de numărul Reynolds al macroscării:

$$\sqrt{Re_{l_I}} = \frac{l_I}{l_\lambda};$$

$$\sqrt[3]{\text{Re}_{l_1}} = \frac{l_1}{l_K}.$$

O altă măsură a turbulenței este criteriul de similitudine Karlovitz, K_a . El furnizează relația dintre cea mai lungă scară de timp, timpul *macroscării Taylor*, și cea mai mică scară de timp, scara de timp Kolmogorov:

$$K_a = \frac{l_1}{l_K}.$$

Cele mai mici vârtejuri penetrează zona de preîncălzire a flăcării la numere Karlovitz apropiate de unitate. În această regiune, grosimea frontului de flacără și viteza flăcării sunt acelea pentru scări mici: $\delta_L \cong l_K$ și $S \cong u_K$.

Numărul Damköhler arată dacă din punct de vedere chimic flacăra este rapidă ($D_a \gg 1$), sau dacă este înceată, ($D_a \ll 1$), raportată la scările turbulente de timp.

Numărul Damköhler indică relația dintre timpul *macroscării Taylor* și timpul scării *pentru reacții chimice*:

$$D_a = \frac{t_{\text{curgere}}}{t_{\text{chimic}}}.$$

Numărul Damköhler poate fi dat în termeni de raport de viteze $\left(\frac{S_L}{u'_{\text{rms}}}\right)$ și de raport de scări de lungimi $\left(\frac{l_0}{\delta_L}\right)$:

$$D_a = \frac{t_0}{t_L} = \left(\frac{l_0}{\delta_L}\right) \left(\frac{S_L}{u'_{\text{rms}}}\right).$$

Aceste numere adimensionale ajută în definirea limitelor pentru diferite domenii în combustie. Procesele de ardere turbulentă cu amestecul combustibil premixat sunt în literatura de specialitate clasificate după viteza de ardere fluctuantă u' și după lungimea macroscopică a turbulenței l_0 .

În acest scop a fost construită diagrama Borghi (Fig. 9). În această diagramă o importanță deosebită o au numerele Reynolds, Karlovitz și Damköhler.

Diagrama Borghi prezintă diferite regimuri pentru arderea cu preamestec [12, 13]. Coordonatele spațiale sunt definite de axele: raportul vitezelor turbulentă și laminară, și raportul lungimilor laminară și turbulentă.

În domeniul în care $Re < 1$, frontul de flacără este laminar și neperturbat. Pentru numere Reynolds mai mari pot fi identificate patru zone diferite, după intensitatea turbulenței $\left(\frac{u'}{S_L}\right)$, numărul Karlovitz (K_a) și numărul Damköhler (Da).

În diagrama Borghi, liniile de $Re=1$, $K_a=1$ reprezintă limitele pentru diferite regimuri de ardere premixată. Linia $Re=1$ separă regimurile turbulente caracterizate de $Re > 1$ de regimul laminar ($Re < 1$).

1.7.4.1 Regimul flăcării laminare

Flacăra laminară reprezintă cazul în care are loc arderea într-un câmp de curgere non-turbulent. Reacțiile chimice au loc netulburate de interacțiuni turbulente. Difuzia diferențiată a reactanților afectează chimia reacțiilor în acest domeniu. Un exemplu de flacăra laminară o reprezintă cazul unei flăcări de la o lumânare.

1.7.4.2 Regimul flăcării ondulate:

Acesta este caracterizat prin:

- $Da > 1$;
- $Ka < 1$;
- $\delta_L \leq l_K$

În acest regim reacțiile chimice au loc în straturi subțiri. În funcție de numărul Reynolds, Re , se poate presupune că reacțiile chimice sunt reacții rapide.

Aceasta înseamnă că reacțiile chimice au loc într-un timp scurt și nu sunt influențate de câmpul de curgere turbulent. Pentru numere Reynolds și Damköhler medii, fluctuația vitezei turbulente este de aproximativ de același ordin de mărime ca și viteza flăcării laminare, $u' \approx S_L$. În acest caz singurul efect al turbulenței este ondularea flăcării.

Acest regim nu e de interes practic. În acest regim, chiar și vârtejurile mari nu sunt destul de puternice pentru a contrabalansa avansul frontului de flacăra caracterizat de viteza laminară de ardere.

Astfel, propagarea laminară a flăcării devine dominantă în acest tip de flacăra, în detrimentul ondulării introduse de turbulență.

1.7.4.3 Regimul flăcării desprinse

Flacăra ondulată și cea desprinsă aparțin regimului de flacăra caracterizată prin inegalitățile:

- $Re_t > 1$ (curgere turbulentă),
- $Da > 1$ (reacții chimice rapide),
- $Ka < 1$ (flacăra slabă insuficient de elastică).

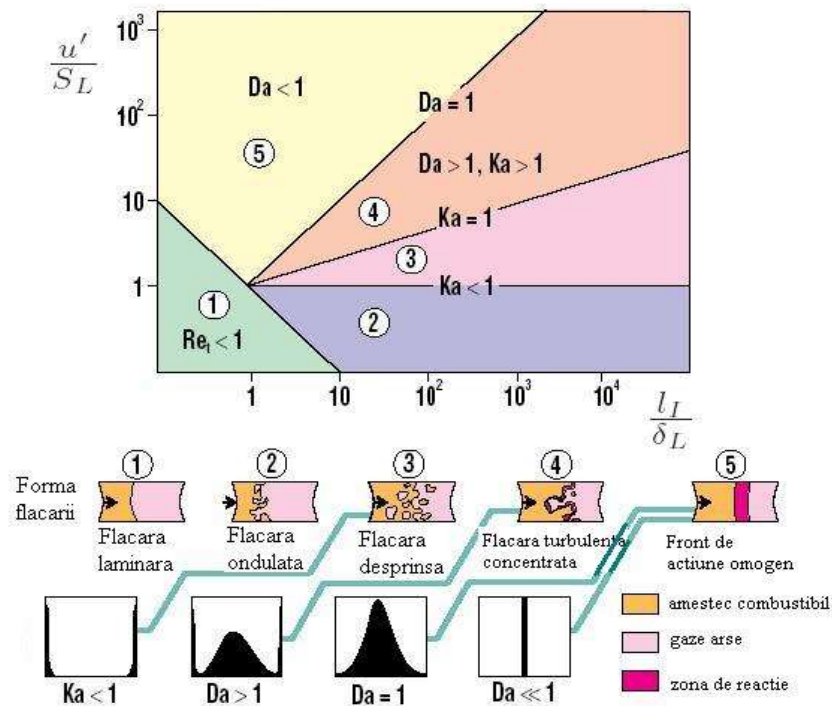


Fig. 9 Diagrama Borghi, după [12, 13]

Considerând limita către regimul de flăcără turbulentă concentrată dată de $Ka=1$, această graniță reprezintă condiția ca grosimea frontului de flăcără să fie egală cu scara Kolmogorov (criteriul Klimov-Williams).

Din moment ce viscozitatea, ca proces de transport molecular, face legătura dintre viteza, lungimea și scara de timp Kolmogorov, în același mod în care viteza, lungimea și scara de timp fac legătura cu propagarea flăcării, durata flăcării este egală cu timpul Kolmogorov și viteza frontului de flăcără este egală cu viteza Kolmogorov.

1.7.4.4 Regimul flăcărilor intens turbulente

Regimul flăcărilor intens turbulente este caracterizat de:

- $Re > 1$,
- $Da > 1$
- $Ka > 1$.

Ultima inegalitate indică faptul că elasticitatea flăcării este puternică și că vârtejuri mici pot să intre în structura flăcării, lărgind structura acesteia. Cu cât vârtejurile sunt mai mici, cu atât mai mari sunt zonele de întindere a flăcării, ceea ce poate duce la stingerea acesteia.

1.7.4.5 Regimul reactiv bine omogenizat

Ultimul regim este regimul reactiv bine omogenizat (well stirred reactor). Acest regim este caracterizat prin:

- $Re > 1$,
- $Ka > 1$
- $Da < 1$.

Ultima inegalitate indică faptul că viteza de desfășurare a reacțiilor chimice este mai mică decât cea a turbulenței.

1.8 Flacăra

1.8.1 Tipuri de flăcări

Flăcările se pot clasifica după două criterii principale:

- tipul de amestec dintre combustibil și aer,
- după regimul de curgere.

În funcție de tipul de amestec între reactanți:

- flăcări premixate - în care combustibilul și aerul sunt amestecate înainte de aprindere. În acest caz arderea poate să aibă loc doar dacă dozajul combustibil-aer este realizat între anumite limite, numite limite de aprindere,
- flăcări parțial premixate - în care o parte din aerul necesar arderii este amestecat cu combustibilul înainte de aprindere, iar cealaltă parte de aer se amestecă difuziv,
- flăcări difuzive sau fără premixare - în care combustibilul și aerul sunt introduse în camera de ardere separat și se amestecă între ele difuziv.

În funcție de regimul de curgere:

- flăcări laminare,
- flăcări turbulente.

O flacăra turbulentă premixată poate să fie produsă de arzătorul cu lampa oxiacetilenică, sau în cazul motoarelor cu aprindere prin scânteie când admisia combustibilului se realizează în același timp cu aerul.

O flacăra laminară premixată poate să fie produsă cu o lampă de tip Bunsen.

Spre exemplu, o flacăra laminară parțial premixată sau difuzivă poate să fie produsă de arzătorul Bunsen, Teclu, inel, arzătorul din centrala de apartament.

O lumânare produce o flacăra difuzivă laminară.

Flăcările turbulente fără premixare (difuzive) pot să fie produse în cazul motoarelor cu aprindere prin compresie, motoarelor cu reacție utilizate în industria aeronautică.

Exemple pentru flacăra laminară fără premixare pot fi flacăra produsă de o lumânare, focul de lemne.

1.8.2 Temperatura flăcării

Un parametru important în procesul de ardere este temperatura flăcării. Temperatura flăcării este determinată de bilanțul energetic dintre reactanți și produșii de ardere la echilibru.

Dacă zona de ardere este spațial foarte îngustă în comparație cu restul domeniului de interes, atunci se consideră temperatura flăcării ca fiind temperatura maximă atinsă în zona de reacție.

Dacă procesul are loc adiabatic, și fără lucru mecanic, sau schimbări în energia cinetică sau potențială, atunci temperatura flăcării este egală cu temperatura flăcării adiabate. Aceasta este temperatura maximă care poate fi atinsă pentru reactanții considerați, deoarece orice transfer de căldură din zona de reacție sau combustie incompletă vor tinde să micșoreze temperatura produșilor de reacție.

Experimental, măsurările temperaturii flăcării adiabate sunt foarte dificil de realizat și în cele mai multe cazuri o valoare calculată este mai corectă decât valoarea măsurată.

Pentru cele mai multe hidrocarburi, temperatura maximă a flăcării adiabate apare în jurul valorii stoichiometrice și anume pentru $\lambda=1.05$. De asemenea, sunt și excepții de la această regulă, cazul C_2H_2 (acetilena) (pentru care λ are valori mai ridicate).

Valorile calculate ale temperaturii maxime a flăcării adiabate precum și viteza maximă de ardere sunt prezentate în Tabel 8.

Temperatura flăcării adiabate se referă la amestecurile stoichiometrice, în afară de cele marcate cu *, acestea reprezentând valorile maxime.

Temperatura flăcării are un efect substanțial asupra vitezei flăcării și a produșilor de reacție. Concentrația de oxizi de azot (NO_x) este de asemenea influențată de temperatura flăcării (cu cât temperatura flăcării este mai mare cu atât concentrația de oxizi de azot din gazele de ardere va fi mai mare).

Tabel 8. Temperatura flăcării adiabate și viteza de ardere pentru diferite combinații de reactanți

Reactanți	Temperatura flăcării adiabate	Viteza maximă de ardere
	K	m/s
$H_2 + O_2$	3083	11.0
$CO + O_2$	2973	1.08
$CH_4 + O_2$	3010	4.5
$C_2H_2 + O_2$	3431	11.4
$H_2 + \text{aer}$	2380	3.1
$CO + \text{aer}$	2400	0.45
$CH_4 + \text{aer}$	2222	0.45
$C_2H_2 + \text{aer}$	2513	1.58
$C_2H_4 + \text{aer}$	2375	0.75
$C_2H_6 + \text{aer}$	2244*	0.4
$C_2H_8 + \text{aer}$	2250*	0.43
$C_3H_8 + \text{aer}$	2253	
$n-C_4H_{10} + \text{aer}$	2256*	0.38
$C_6H_6 + \text{aer}$	2365*	0.41
$C_2H_3OH + \text{aer}$	2411*	1.05

După cum a fost amintit anterior, în cazul flăcărilor la temperaturi peste 1250K, presupunerea că produșii finali rezultați în urma arderii sunt doar CO_2 și/sau H_2O nu este corectă, și poate să ducă la erori destul de mari, deoarece de la această temperatură are loc disocierea gazelor, proces endoterm (are nevoie de căldură), temperatura în acest caz fiind mai mică decât cea teoretică.

Orientativ, această diferență poate să fie în jur de 8% pentru o temperatură teoretică de 2000°C.

Flăcările pot fi clasificate după criterii multiple. După cum combustibilul și oxidantul ating frontul de flacără, există flăcări fără preamestec și flăcări cu amestec parțial sau total.

Se pot clasifica după modele de reactoare bazate pe cinetica chimică în reactor bine omogenizat (well stirred reactor) și reactor cu curgere în blocuri (plug flow reactors).

În cazul flăcărilor fără preamestec, combustibilul și oxidantul sunt prezenți fiecare de cealaltă parte a zone de reacție. Ei sunt aduși în zona de reacție separat și datorită difuziei rezultă produși de reacție. În cazul acestor tipuri de flăcări, zona de reacție este situată în regiunea unde entalpia totală a reactanților este egală cu entalpia totală a produșilor de ardere plus pierderile de energie. De aceea, pentru flăcările fără preamestec reacția ideală are loc în condiții stoichiometrice, rezultând temperatura maximă a flăcării pentru un amestec dat de reactanți (ex: arderea combustibililor solizi).

În cazul flăcărilor cu preamestec total, combustibilul este amestecat cu oxidantul într-un proces separat înainte de a atinge zona de reacție, cunoscută și sub numele de front de flacără. La aceste tipuri de flăcări, poziția frontului de flacără nu este definită de reacțiile de difuzie dintre reactanți, ci de echilibrul dintre viteza de înaintare a amestecului combustibil și viteza de ardere a acestuia. Aplicând metode de stabilizare, amestecul carburant poate fi ars la dozaje superioare limitei maxime de aprindere. În acest caz se vor obține temperaturi scăzute ale flăcărilor (ex: arderea în focare închise).

În cazul flăcărilor cu preamestec parțial, combustibilul este injectat în curentul de oxidant cu puțin înaintea flăcării. În aceste condiții, nu este timp suficient pentru ca oxidantul și combustibilul să se amestece bine și de aceea, gradientii de concentrație sunt generați în curentul reactant care intră în frontul de flacără. Cum aceste tipuri de flăcări nu sunt nici fără preamestec, nici cu amestec total, ele au fost denumite flăcări cu preamestec parțial. Aceste flăcări sunt caracterizate de gradul lor de neamestec, care este o măsură a gradului de variație a concentrației radiale a amestecului combustibil față de cazul cu preamestec total. (ex: flacăra de la aragaz).

O flacără laminară (un front de flacără laminar) poate să apară într-un amestec combustibil în repaus sau dacă amestecul combustibil este în curgere laminară. Pe de altă parte, un amestec combustibil aflat în regim de curgere turbulent va genera o flacără turbulentă.

Reactorul bine omogenizat (well stirred reactor) este un simulator cinetic chimic în condiții de înaltă turbulență, cu temperatură și compoziții reactanți uniform distribuiți în volumul reactorului. Este o situație ideală care poate fi aplicată des în curgerile cu o intensitate turbulentă mare. Este o condiție în care produșii de ardere sunt amestecați atât de repede cu reactanții, că nu există timp pentru formarea gradientilor de temperatură în zona de reacție, care are un volum finit. Acest model se aplică în condițiile de amestec foarte bun și la rate de reacție ridicate. Utilizarea sa este folositoare în cazul în care se studiază stabilizarea flăcării sau formarea de NOx.

Reactorul cu curgere în blocuri (plug flow reactors) este un model care se aplică în cazul în care nu există un proces de amestec pe direcția de curgere. Aici reacțiile au loc de-a lungul curgerii. Gradientii termici și de compuși sunt generați pe axa curgerii datorită procesului de difuzie. Acest model caracterizează sistemele la care ratele de reacție sunt încete și nu se efectuează recircularea produșilor de ardere.

1.8.3 Viteza de ardere

Viteza de ardere reprezintă viteza cu care se propagă o flacără într-un amestec combustibil.

Marginea flăcării care se propagă prin amestecul combustibil poartă denumirea de front de flacără.

Viteza de ardere în cazul flăcărilor premixate depinde de compoziția chimică a reactanților și de reacțiile chimice între aceștia.

Definirea lungimilor și a timpilor a condus la determinarea unui număr corespunzător de scări de viteze [14].

Parametrii care influențează viteza de ardere sunt:

- conținutul de hidrogen al combustibilului: cu cât participația hidrogenului în combustibil este mai mare, cu atât și viteza de ardere va fi mai mare,
- creșterea concentrației de oxigen din oxidant va duce la creșterea vitezei de ardere. În cazul gazului metan, viteza va crește de 10 ori, în cazul arderii doar cu oxigen (Tabel 8).
- excesul de aer necesar pentru procesul de ardere. Arderea poate avea loc doar între limitele de aprindere caracteristice pentru fiecare combustibil,
- crescând temperatura amestecului combustibil, viteza de ardere va crește,
- influența regimului de curgere: viteza de ardere turbulentă este mai mare decât viteza de ardere laminară,
- crescând presiunea amestecului combustibil, viteza de ardere va crește.

1.8.4 Viteza laminară de ardere

Viteza laminară de ardere este o proprietate a amestecului combustibil. Este viteza cu care un front de flacără laminar se va propaga printr-un amestec în repaus de reactanți nearși.

Viteza laminară de ardere depinde de trei parametri:

- difuzivitatea termică a amestecului combustibil (a),

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

unde λ reprezintă conductivitatea termică,

ρ este densitatea,

c reprezintă căldura specifică a amestecului combustibil.

- rata de reacție a amestecului (ω),
- temperatura în zona de reacție.

$$s_L = \sqrt{a\omega \frac{T_{gaze} - T_{aprindere}}{T_{aprindere} - T_{amestec}}}$$

unde T_{gaze} reprezintă temperatura produșilor de reacție,

$T_{aprindere}$ reprezintă temperatura de aprindere a amestecului combustibil,

$T_{amestec}$ reprezintă temperatura amestecului combustibil înainte de aprindere.

Din punct de vedere cinetic, frontul de flacără laminar se poate propaga într-un amestec combustibil în repaus, sau în curgere laminară, deci poate fi:

- în deplasare cu viteza de ardere, într-un amestec combustibil în repaus cu condiția ca starea termodinamică a amestecului combustibil să nu varieze (Fig. 10);
- staționar în spațiu, în cazul în care amestecul combustibil se deplasează cu viteza normală de ardere (Fig. 11).

Un caz mai general este acela al curgerii laminare a unui amestec combustibil cu o viteză mai mare decât viteza laminară de ardere. În acest caz, un front de flacără stabilizat va prezenta o înclinare față de liniile de curent ale jetului de amestec combustibil cu un unghi α astfel încât să fie satisfăcută egalitatea între componenta înclinată a vitezei de înaintare $w \cdot \cos \alpha$ și viteza laminară de ardere u_0 (Fig. 12).

$$w \cdot \cos \alpha = u_0$$

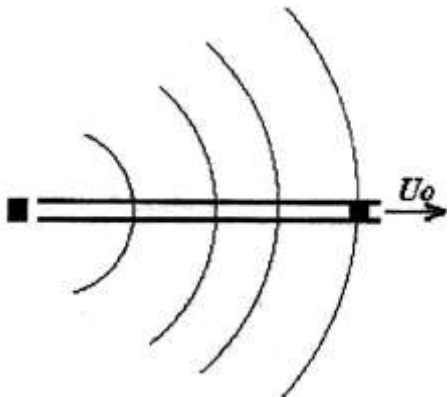


Fig. 10 Front de flacără laminar (amestec combustibil în repaus) [1]

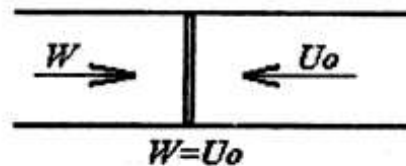


Fig. 11 Front de flacără laminar (amestec combustibil în curgere) [1]

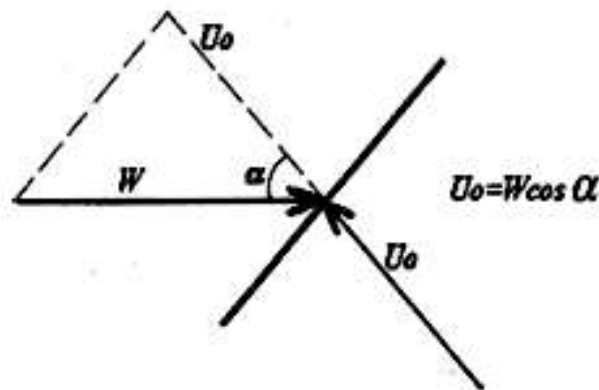


Fig. 12 Unghiul frontului de flacără față de jetul de amestec combustibil [1]

Din Tabel 8 se poate observa că valoarea vitezei maxime de ardere este influențată în primul rând de natura combustibilului.

De asemenea, trebuie precizat că printr-o abatere de la modelul cinetic al arderii în care viteza maximă de ardere corespunde dozajului stoichiometric, s-a constatat experimental că viteza normală de ardere maximă corespunde unui dozaj puțin diferit de cel stoichiometric și anume 1.05.

Scăderea vitezei normale de ardere la dozaje diferite este pronunțată, astfel, în cazul metanului o creștere sau o scădere a dozajului cu 40% duce la scăderea vitezei de ardere cu 1/3. Explicația este pe de o parte că și excesul de aer și excesul de combustibil constituie molecule inerte prin care

lanțurile de reacție se întrerup, pe de altă parte și temperatura reacției va scădea deci conform relației lui Arrhenius, viteza de ardere va scădea exponențial.

Variația vitezei laminare de ardere, în funcție de valoarea dozajului, pentru o serie de combustibili gazoși uzuali se poate urmări în Fig. 13.

De asemenea, din Tabel 7 se pot observa limitele dozajului în afara căruia arderea nu este posibilă, amestecul combustibil nefiind inflamabil. Explicația este aceea că în afara limitelor de inflamabilitate numărul relativ de molecule inerte (aer sau combustibil în exces) este atât de mare încât după ce reacțiile de ardere se amorsează printr-o aprindere, ele se sting și nu se propagă mai departe datorită întreruperii lanțurilor de către moleculele inerte.

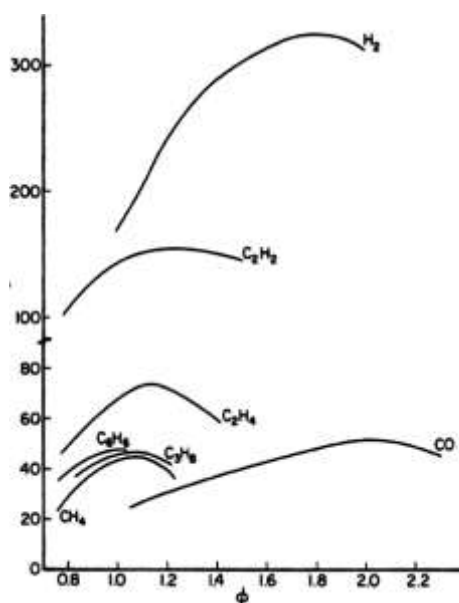


Fig. 13 Viteza laminară de ardere în funcție de dozaj [15]

1.8.5 Viteza turbulentă de ardere

Una din cele mai importante probleme nerezolvate în cazul arderii turbulente premixate este determinarea vitezei turbulente de ardere.

În timp ce viteza de ardere laminară este o proprietate a amestecului combustibil, viteza turbulentă de ardere va depinde atât de proprietățile chimice ale amestecului combustibil, cât și de proprietățile curgerii și de turbulență. Asta deoarece cu creșterea vitezei, flacăra începe și se încrețește, apoi se ondulează și în cele din urmă frontul de flacăra nu va mai fi unul continuu, iar viteza de ardere turbulentă va fi influențată de vârtejurile turbulente din zona de reacție.

Viteza turbulentă de ardere este o mărime ce caracterizează în mod global, la nivel macroscopic, procesul de ardere a unui amestec combustibil în regim de curgere turbulent.

Datorită pe de o parte pulsației turbulente a vitezei curentului de amestec combustibil, iar pe de altă parte, a faptului că viteza normală de ardere este constantă pentru amestecul respectiv de carburant-comburant, frontul de flacăra va căpăta o formă ondulată. Viteza normală de ardere va fi perpendiculară pe orice element de suprafață din cadrul frontului de flacăra și egală cu componenta normală pe respectivul element de suprafață a vitezei momentane de înaintare, de aici rezultând forma ondulată a frontului de flacăra.

La nivel macroscopic, ondularea frontului de flacăra are ca efect apariția unei anumite grosimi a acestuia (2-3 mm) spre deosebire de cazul frontului de flacăra laminar cu grosime mică (0.2 mm).

De asemenea, viteza frontului de flacără turbulent crește la valori ce depășesc viteza normală de ardere. Această viteză aparentă de deplasare a frontului de flacără se numește *viteză turbulentă de ardere*.

Curgerea turbulentă a fluidului se caracterizează prin regimul nestaționar și neregulat, tridimensionalitate, valori mari ale criteriului Reynolds, întoarcerea liniilor de curent, efectul de disipare a energiei cinetice prin transformare în căldură datorită viscozității și caracterul difuziv accentuat ce constă în amestecul rapid al participanților la curgere.

Transferul de impuls generat de turbulență este mult mai mare decât cel datorat difuziei moleculare. În mișcarea turbulentă apar vârtejuri de diferite mărimi, în același volum de fluid putând coexista vârtejuri mari și mici. Vârtejurile mari, cu dimensiunea comparabilă cu cea a domeniului studiat, sunt asociate fluctuațiilor de frecvență mică și influențează în cea mai mare parte transferul de impuls. Vârtejurile mici, sunt caracterizate de o viteză mare și sunt determinate de forțele vâscoase.

Turbulența este caracterizată prin trei mărimi importante pentru procesul de ardere:

- intensitatea medie a turbulenței;
- scara turbulenței;
- coeficientul de difuzie turbulentă.

Debitul masic prin suprafața instantanee a flăcării turbulente (Fig. 14) poate fi scris ca:

$$\dot{m} = \rho_u s_L A_T = \bar{\rho}_u s_T A$$

unde ρ_u reprezintă densitatea amestecului nears,

s_L este viteza laminară de ardere,

A_T este aria totală a suprafeței instantanee a flăcării turbulente,

s_T este viteza turbulentă de ardere,

A reprezintă aria secțiunii transversale.

Din ecuația de mai sus și ținând cont de faptul că densitatea este constantă, rezultă:

$$\frac{s_T}{s_L} = \frac{A_T}{A}$$

Totodată, Damkohler (1940) a presupus că interacțiunea dintre frontul de flacără ondulat și curgerea turbulentă este pur cinematică. Utilizând analogia geometrică cu o flacără de tip Bunsen, a stabilit că creșterea suprafeței ondulate a flăcării este legată de raportul dintre fluctuația vitezei turbulente și viteza laminară de ardere:

$$\frac{A_T}{A} \sim \frac{v'}{s_L}$$

Viteza turbulentă de ardere va fi egală cu:

$$s_T = \frac{A_T s_L}{A}$$

Iar:

$$v' \sim \frac{A_T s_L}{A}$$

rezultă:

$$s_T \sim v'$$

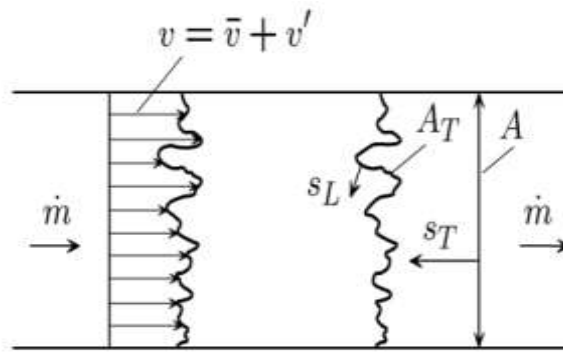


Fig. 14 Caracterizare front de flacără turbulentă [16]

Pentru scări mici de turbulență, care corespund regimului flăcării turbulente concentrate (Thin reaction zones regime), Damkohler a demonstrat că turbulența modifică doar transportul dintre zona de reacție și amestecul nears.

$$s_L \sim \left(\frac{D}{t_c}\right)^{\frac{1}{2}}$$

unde D este difuzivitatea moleculară,
 t_c reprezintă scara chimică de timp.

Prin analogie cu reprezentarea vitezei laminare de ardere, viteza turbulentă de ardere este:

$$s_T \sim \left(\frac{D_t}{t_c}\right)^{\frac{1}{2}}$$

unde D este difuzivitatea turbulentă.

Se observă că timpul scării chimice de timp nu este influențat de turbulență. Această presupunere se dovedește neadevărată pentru situația în care vârtejuri la scara Kolmogorov intră în zona de reacție subțire (thin reaction zone).

Din ecuațiile de mai sus rezultă:

$$\frac{s_T}{s_L} \sim \left(\frac{D_t}{D}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$D_t \sim v'l$$

$$D \sim s_L l_F$$

unde l_F reprezintă grosimea frontului flăcării.

l reprezintă grosimea frontului de flacără laminar.

Din ecuațiile de mai sus rezultă că raportul dintre viteza flăcării turbulente și viteza flăcării laminare este proporțională cu:

$$\frac{s_T}{s_L} \sim \left(\frac{v'l}{s_L l_F}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Știind că $s_T \sim v'$, rezultă:

$$\frac{s_T}{s_L} = 1 + C \left(\frac{v'}{s_L}\right)^n$$

unde n este un exponent ajustabil cuprins între 0.5-1, prin compararea cu măsurările experimentale, de cele mai multe ori valoarea adoptată fiind în jurul 0.7,

C este o constantă care depinde de raportul scărilor $\frac{l}{l_F}$.

Intensitatea medie a turbulenței este egală cu raportul dintre viteza medie pătratică fluctuantă a curentului și viteza medie de deplasare:

$$\varepsilon_x = \frac{w_x'}{w_x} \quad \varepsilon_y = \frac{w_y'}{w_y} \quad \varepsilon_z = \frac{w_z'}{w_z}$$

Din punct de vedere cinematic, scara turbulenței reprezintă amplitudinea mișcării particulelor în jurul liniei medii de curent ca urmare a fluctuației locale de viteză.

1.8.6 Diametrul de stingere

Prezența pereților într-o cameră de ardere duce în general la pierderi de căldură prin aceștia, de la flacăra și gazele de ardere. În acest mod pereții pot deveni zone în care lanțul cinetic al arderii poate fi întrerupt.

Totodată, există un diametru critic sub care flacăra nu poate să se propage în continuare, aceasta stingându-se, denumit diametrul de stingere.

Această proprietate se utilizează pentru dezvoltarea sitelor antiretur, ceea ce previne deplasarea flăcării în amonte în cazul unui preamestec de combustibil-oxidant.

Valoarea diametrului de stingere variază în funcție de tipul de combustibil:

- hidrogen: 0.7mm
- metan: 2mm
- propan 1.8mm

Anexa 1. Proprietăți legate de ardere pentru combustibili uzuali

	H ₂	CH ₄	C ₃ H ₈	Benzina
Temperatura minimă de aprindere [mJ]	0.02	0.28	0.25	0.25
Temperatura de aprindere [°C]	585	537	510	257
Temperatura flăcării adiabate [°C]	2111	1954	1995	1997
Limitele de aprindere (% în aer)	4.1-7.5	4.3-15	2.2-9.5	1.5-7.6
Viteza flăcării laminare [cm/s]	270	38	40	30

Anexa 2. Limitele de aprindere pentru diverși combustibili [17]

Combustibili în stare gazoasă (denumirea în limba engleza)	Limita de aprindere inferioară (LFL) [%]	Limita de aprindere superioară (UFL) [%]
	volumic în aer	volumic în aer
Acetaldehyde	4	57
Acetic acid (glacial)	4	19.9
Acetone	3	13
Acetyl chloride	7.3	19
Acetylene	2.5	82
Acrolein	2.8	31
Acrylonitrile	3	17
Allyl chloride	2.9	11.1
Ammonia	15	28
Arsine	5	78
Benzene	1.2	7.8
1,3-Butadiene	2	12
Butane, n-Butane	1.6	8.4
n-Butyl acetate, Butyl acetate	1 - 1.7	8 - 15
Butyl alcohol, Butanol	1	11
n-Butanol	1.4	11.2
n-Butyl chloride, 1-chlorobutane	1.8	10.1
n-Butyl mercaptan	1.4	10.2
Butyl methyl ketone, 2-Hexanone	1	8
Butylene, 1-Butylene, 1-Butene	1.98	9.65
Carbon disulfide	1	50
Carbon Monoxide	12	75
1-Chloro-1,1-difluoroethane	6.2	17.9
Cyanogen	6.0 - 6.6	32 - 42.6
Cyclobutane	1.8	11.1
Cyclohexane	1.3	7.8 - 8
Cyclohexanol	1	9
Cyclohexanone	1 - 1.1	9 - 9.4
Cyclopentane	1.5 - 2	9.4
Cyclopropane	2.4	10.4
Decane	0.8	5.4
Diborane	0.8	88
1,1-Dichloroethane	6	11
1,2-Dichloroethane	6	16
1,1-Dichloroethene	6.5	15.5

Dichlorosilane	4-4.7	96
Diesel fuel	0.6	7.5
Diethanolamine	2	13
Diethylamine	1.8	10.1
Diethyl ether	1.9 - 2	36 - 48
1,1-Difluoroethane	3.7	18
1,1-Difluoroethylene	5.5	21.3
Diisobutyl ketone	1	6
Diisopropyl ether	1	21
Dimethylamine	2.8	14.4
Dimethyl sulfoxide	2.6 - 3	42
1,4-Dioxane	2	22
Epichlorohydrin	4	21
Ethane	3	12- 12.4
Ethanol, Ethyl Alcohol	3 - 3.3	19
2-Ethoxyethanol	3	18
2-Ethoxyethyl acetate	2	8
Ethyl acetate	2	12
Ethylamine	3.5	14
Ethylbenzene	1	7.1
Ethylene	2.7	36
Ethylene glycol	3	22
Ethylene oxide	3	100
Ethyl Chloride	3.8	15.4
Fuel oil No.1	0.7	5
Furan	2	14
Gasoline (100 Octane)	1.5	7.6
Glycerol	3	19
Heptane, n-Heptane	1.05	6.7
Hexane, n-Hexane	1.1	7.5
Hydrogen sulfide	4.3	46
Isobutane	1.8	9.6
Isobutyl alcohol	2	11
Isophorone	1	4
Isopropyl alcohol, Isopropanol	2	12
Kerosene Jet A-1	0.6 - 0.7	4.9 - 5
Methane (Natural Gas)	4.3	15
Methyl acetate	3	16
Methyl Alcohol, Methanol	6 - 6.7	36
Methyl Chloride	10.7	17.4
Methyl ethyl ketone	1.8	10
Methyl mercaptan	3.9	21.8

Mineral spirits	0.7	6.5
Morpholine	1.8	10.8
Naphthalene	0.9	5.9
Neohexane	1.19	7.58
Nickel tetracarbonyl	2	34
Nitrobenzene	2	9
Nitromethane	7.3	22.2
Octane	1	7
iso-Octane	0.79	5.94
Pentane	1.5	7.8
n-Pentane	1.4	7.8
iso-Pentane	1.32	9.16
Propane	2.2	9.5
Propyl acetate	2	8
Propylene	2	11.1
Propylene Oxide	2.3	36
Pyridine	2	12
Silane	1.5	98
Styrene	1.1	6.1
Tetrahydrofuran	2	12
Toluene	1.2 -1.27	6.75 - 7.1
Vinyl acetate	2.6	13.4
Vinyl chloride	3.6	33
Xylenes	0.9 - 1.0	6.7 - 7.0
m-Xylene	1.1	7
p-Xylene	1	6

Referințe bibliografice

1. Apahidean B. and Mrenes M., *Combustibili si teoria proceselor de ardere*. U.T.Pres, 1997.
2. Irvin Glassman, *Combustion (third edition)*. Elsevier, 1997.
3. Gardiner, M., *Pocket Guide to fire and arson investigation*.
4. ***, <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Ideal-stoichiometry.jpg>.
5. Stokes G., *On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums*. Transactions of the Cambridge Philosophical Society 1851. **9**: p. 8-106.
6. Reynolds O., *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels*. Philosophical Transactions of the Royal Society, 1883. **174**(0): p. 935-982.
7. ***, <http://www.expertsmind.com/topic/mechanical-engineering/laminar-and-turbulent-flow-96743.aspx>.
8. Lewis Fry Richardson, *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge University Press, 1922.
9. S. Gogineni and C. Shih, *Experimental investigation of the unsteady structure of a transitional plane wall jet*. Experiments in Fluids, 1997. **23**: p. 121-129.
10. Danaila S. and Berbente C., *Metode numerice in dinamica fluidelor*. Editura Academiei, 2003.
11. ***, <http://en.wikipedia.org/wiki/Turbulence>.
12. El-Mahallawy F. and El-Din Habik S., *Fundamentals and technology of combustion*. Elsevier, 2002.
13. Robin V., et al., *Experimental and numerical analysis of stratified turbulent V-shaped flames*. Combustion and Flame 2008.
14. Anderson D.A., Tannehill J.C., and Fletcher R.H., *Computational fluid mechanics and heat transfer*. 1984.
15. Irvin Glassman, *Combustion (Second Edition)*. Academic Press, Orlando, Florida, U.S.A, 1987: p. 501.
16. Peters Norbert, *The turbulent burning velocity - Course 13*. 1999.
17. ***, http://en.wikipedia.org/wiki/Flammability_limit.