

LIEPSNOS KOKYBINIŲ POKYČIŲ TYRIMAS, KEIČIANT DEGIOJO MIŠINIO SUDĖTĮ

Darbo tikslas

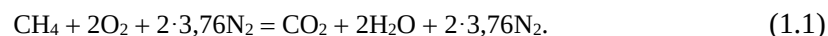
Kokybiškai įvertinti priklausomybę tarp degiojo mišinio paruošimo ir aerodinaminių degimo proceso vyksmo sąlygų.

Teorinė dalis

Degimas yra sudėtingas fizikocheminis procesas, kuris vyksta dėl degiosios medžiagos ir oksidatoriaus sąveikos. Šio proceso metu intensyviai išsiskiria šiluma ir šviesa. Oksidatoriais gali būti pačios įvairiausios medžiagos: deguonis, chloras, bromas ir kt. Dažniausiai degimas vyksta ore, kur oksidatorius yra deguonis. Nors cheminėse degimo reakcijose azotas nedalyvauja, bet būtina reikia atsižvelgti į jo buvimą degimo zonoje, nes jis dalyvauja fizikiniuose procesuose:

- 1 – azoto šildymui degimo zonoje sunaudojamas didelis šilumos kiekis, išsiskiriantis degimo metu;
- 2 – azoto buvimas cheminės sąveikos zonoje turi įtakos cheminės reakcijos greičiui, nes azotas yra kaip neutralus reaguojančių (degiosios medžiagos ir oksidatoriaus) medžiagų praskiediklis.

Degimo ore reakcijos lygtys yra rašomos, pridėdant prie kairiosios ir dešinėsios pusių po 3,76 molių N₂ (azotas) kiekvienam moliui deguonies. Pvz., metano degimo ore reakcija:



Cheminės degimo reakcijos vyksta pakankamai aukštose temperatūrose, todėl susidaro koncentracijų, temperatūrų, srautų greičių laukų

nevienalytiškumas. Degimo proceso intensyvumas priklauso nuo dujų ir oro judėjimo greičio, difuzijos ir šilumos perdavimo greičio, taip pat nuo degiosios medžiagos ir oksidatoriaus agregatinės būsenos, nuo degiojo mišinio paruošimo ir dujų dinaminių procesų vyksmo sąlygų. Apžvelgsime degimo rūšis atsižvelgdami į išvardytus degimo veiksnus.

Prasidėjus degimo procesui tolimesnis degimo šaltinis yra pati degimo zona, kurioje vyksta intensyvus šilumos išsiskyrimas. Ši šiluma ir yra tolesnio degimo palaikymo priežastis. Taigi degimo procesą schematiškai galima apibūdinti kaip nepertraukiamą palaipsninį užsiliepsnojamą ir vis naujų ir naujų degiojo mišinio porcijų sudegimą.

Pagal cheminių degimo reakcijų zonos išplitimo degiajame mišinyje mechanizmą išskiriami du degimo režimai:

1 – deflagacinis. Tai lėtas cheminis reakcijų zonos plitimas. Šilumos judėjimo greitis degiajame mišinyje yra nuo 0,5 iki 5,0 m/s;

2 – detonacinis. Šis degimas sklinda smūginės bangos greičiu, t. y. nuo keleto šimtų metrų per sekundę iki keleto kilometrų per sekundę.

Gaisro atveju degimas vyksta deflagaciniu režimu. Detonacinis degimas yra sproginimas. Jis įvyksta rečiau, tik sprogdant degių dujų mišiniams.

Pagal degių mišinių komponentų agregatinę būseną degimas skirstomas į dvi rūšis arba į du degimo režimus:

1 – homogeninis degimas, kai abu degimo komponentai (degioji medžiaga ir oksidatorius) yra tos pačios agregatinės būsenos;

2 – heterogeninis degimas, kai degimo sistemos komponentai yra skirtingų agregatinių būsenų.

Degant dujoms, degioji medžiaga ir oksidatorius yra tos pačios agregatinės būsenos. Toks degimas vadinamas **homogeniniu**. Šiuo degimo režimu dega ne tik dujos, bet ir skysčiai, kietosios medžiagos, nes kaitinamos jos garuoja (skysčiai) ir skyla (kietos), susidaro garai ir dujos.

Heterogeninio (be liepsnos) degimo pavyzdžiu gaisro atveju gali būti anglies likučių rusenimas, kai visi lakieji komponentai jau sudegę. Šis degimas dar vadinamas **smilkimu**. Smilkimas gali būti intensyvus, kai išsiskiriant dideliu šilumos kiekiui jis vėl gali pereiti į liepsninį degimą. Smilkimas gali prasidėti ir gaisro pradžioje, kai yra mažo stiprumo uždegimo šaltinis. Dėl to negali prasidėti intensyvi kietųjų medžiagų pirolizė ir susidaryti dujinis mišinys, kuris dega su liepsna. Tik tada, kai kietoje degiojoje medžiagoje prisikaupia šilumos, padidėja temperatūra ir įšildytos masės sluoksnis. Taip pagreitinamas pirolizės procesas, o kartu ir lakiųjų medžiagų išsiskyrimas. Lakiosios medžiagos maišosi su O_2 ir susidaro dujinis mišinys, kuris veikiamas smilkimo temperatūros užsiliepsnoja. Taip prasideda daugelis gaisrų. Pvz.: numetant nuorūką, neužgesintą degtuką ir t. t. Esant heterogeniniam degimo režimui, cheminės oksidacijos reakcijos vyksta fazių sąlyčio riboje. Kai medžiaga poringa, reakcija gali plisti ir į porų vidų, bet vis vien ji vyksta fazių sąlyčio riboje (oras yra tarp porų). *Heterogeninio degimo (smilkimo) plitimo greitis paprastai yra mažesnis už homogeninį (degimą su liepsna) degimo greitį*. Heterogeninio proceso intensyvumas priklauso nuo degiųjų komponentų patekimo į degimo zoną ir degiosios medžiagos paviršiaus ypatumų.

Jei nagrinėtume srautų judėjimo įtaką degimo procesui, tai matytume, kad jų pobūdis taip pat turi įtakos šilumos ir masės perdavimams, todėl ir į tai reikia atsižvelgti. Esant mažam srautų judėjimo greičiui, atskiros dujų srovės juda paraleliai viena kitos atžvilgiu. Toks tvarkingas judėjimas vadinamas **laminariniu**. Esant laminariniam judėjimui, greitis kiekviename taške bėgant laikui nesikeičia ir greičio pasiskirstymas kanale yra parabolinis.

Padidėjus srauto greičiui, srovių paralelinis judėjimas suyra, jų judėjimo kelias išsikraipo ir gretimos dujų srovės susimaišo. Esant didelėms Reinoldso koeficiento (Re) reikšmėms, srauto judėjimas tampa **turbulentiniu**. Kiekviename turbulentinio srauto taške judėjimo greitis keičiasi pagal dydį ir kryptį. Taigi turbulentinis judėjimas yra analogiškas molekuliniam judėjimui. Skirtumas yra tas, kad susimaišymas molekulinio judėjimo atveju vyksta dėl molekulių šiluminio judėjimo, o turbulentinio judėjimo atveju – dėl netvarkingo dujų molekulių judėjimo. *Srauto turbulizacijos laipsnis nustatomas*

inercijos jėgos (sunkio jėga ir kinetinę energiją atitinkanti jėga) ir klampumo jėgos santykiu. Šis santykis ir yra Reinoldso koeficientas:

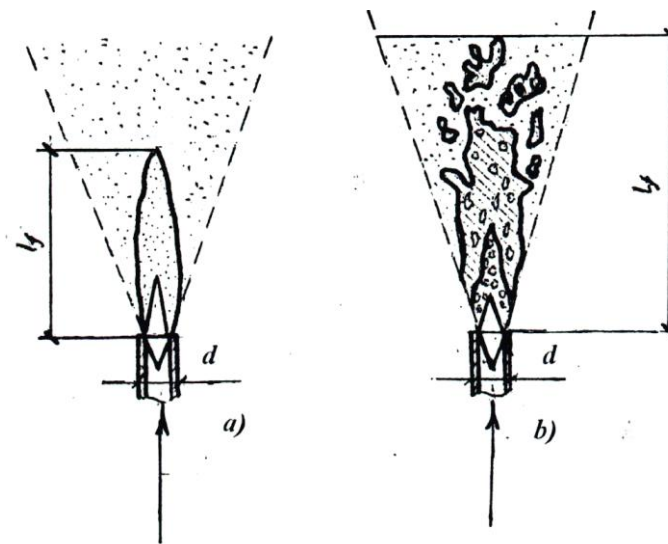
$$Re = v \cdot \frac{d}{\gamma}, \quad (1.2)$$

čia v – vidutinis srauto greitis, m/s;

d – degiklio skersmuo, m;

γ – kinematinės klampos koeficientas, m^2/s .

Eksperimentais buvo nustatyta, kad esant $Re < Re_{kr}$, (kuris lygus 2300), judėjimas yra laminarinis, esant didesnėms Re koeficiento reikšmėms – turbulentinis. Atitinkamai ir degimas tuose srautuose vadinamas **laminariniu** ir **turbulentiniu**. Lygindami laminarinį ir turbulentinį degimus matome, kad pastarajame staigiai didėja degimo greitis, liepsnos fakelas, palyginus su laminariniu liepsnos fakelu, yra iškreiptas (1.1 pav.).



1.1 pav. Laminarinis (a) ir turbulentinis (b) liepsnos fakelai

Ir laminarinio, ir turbulentinio liepsnos fakelo ilgis priklauso nuo dujų ištekmės iš degiklio greičio, degiklio diametro.

Kai degiosios dujos ir oras į degimo zoną patenka susimaišę prieš degimą, toks degimas vadinamas **kinetiniu**. Šios rūšies degimas apibūdinamas cheminės reakcijos kinetika, t. y. reakcijos greičiu, kuris išreiškiamas Arenijaus lygtimi:

$$v = k_0 \cdot C_d^m \cdot C_o^n \cdot e^{-E/RT}, \quad (1.3)$$

čia v – vidutinis srauto greitis, m/s;

k_0 – reakcijos greičio konstanta;

C_d, C_o – atitinkamai degiosios medžiagos ir oksidatoriaus koncentracijos;

m, n – reakcijos stochiometriniai koeficientai;

E – aktyvacijos energija;

T – degiojo mišinio temperatūra;

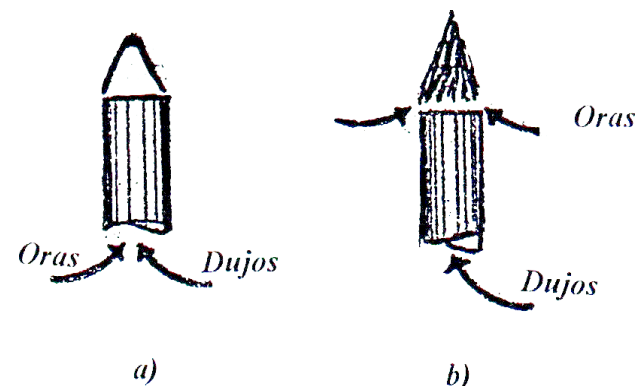
R – universalioji dujų konstanta.

Kaip matyti, reakcijos greitis priklauso nuo reaguojančių medžiagų prigimties (aktyvacijos energija skirtinga), koncentracijų, temperatūros. Todėl norint nutraukti degimą, pirmiausia reikia mažinti temperatūrą. Kinetiniam mišinio degimui yra būdingas didelis reakcijos greitis, didelis liepsnos plitimo greitis. Toks degimas uždaruose tūriuose yra sprogstamojo pobūdžio.

Tuo atveju, kai komponentai (oksidatorius ir degiosios dujos) į degimo zoną patenka atskirai, degimas yra **difuzinis**. Šis degimo režimas dažniausiai būna gaisro atveju. Degimo reakcijai reikalingas oksidatorius į degimo zoną patenka dėl molekulinės difuzijos. Difuzinis dujų degimas ir su juo susiję masės bei šilumos mainai vyksta sudėtingomis aerodinaminėmis sąlygomis. Šie procesai vyksta liepsnos fakelo viduje, kurio ilgis išreiškia bendrą difuzinio degimo efektyvumą. Šalia molekulinės difuzijos, degimui įtakos turi ir *konvektyvi difuzija*. Kadangi difuzijos greitis yra mažesnis už cheminės reakcijos greitį, tai visą difuzinį degimo procesą limituoja difuzija.

Priklausomai nuo degimo režimo (kinetinis ar difuzinis) keičiasi parametrai, kuriais yra apibūdinamas degimas, pvz., degimo greitis,

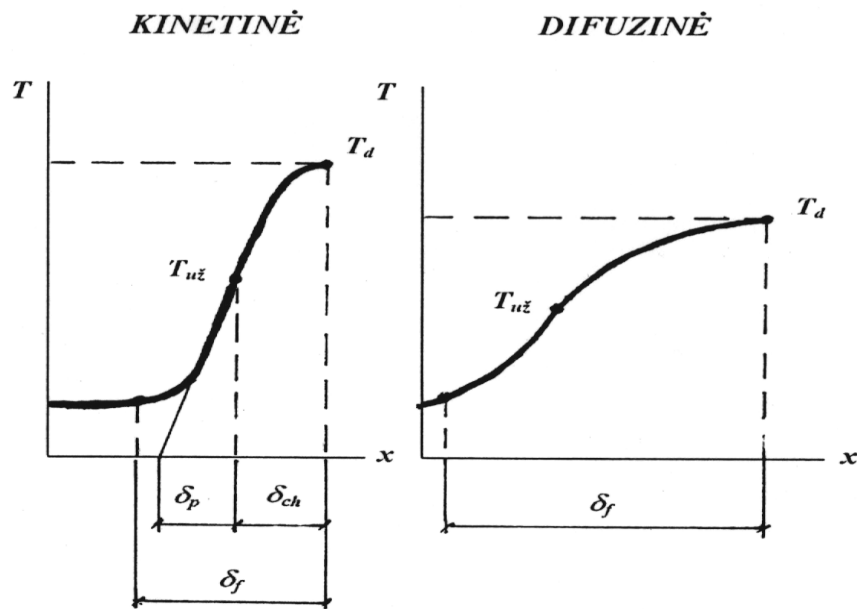
temperatūra, liepsnos fakelo forma (1.1 pav.). Šiluma ir medžiaga tais degimo režimais perduodama skirtingai, o tai būtent ir apibūdina degimą.



1.2 pav. Kinetinis (a) ir difuzinis (b) liepsnos fakelas Biunzeno degiklyje

Difuzinės liepsnos struktūra skiriasi nuo kinetinės liepsnos struktūros. Šiuo atveju cheminių reakcijų greitis apibūdinamas ne pačios reakcijos greičiu, bet degiojo mišinio susidarymo greičiu, nes degusis mišinys susidaro pagal difuzijos mechanizmą. Difuzinės liepsnos spalva (raudonai-gelsva) skiriasi nuo kinetinės (melsva), nes difuzinės liepsnos švytėjimas paremtas ne dujų molekulių išspinduliavimu, kaip kinetinėje liepsnoje, o šiluminiu kietųjų anglies dalelių, susidariusių nevisiškai sudegus komponentams, išspinduliavimu. Komponentai nevisiškai sudega, nes degiojo mišinio susidarymas nereguliuojamas, jis vyksta pagal fizikinius dujų sumaišymo dėsnius. Taigi, degimo zonos struktūra keičiasi, didėja liepsnos fakelo storis, prieš liepsną susidaro zona, kurioje degusis mišinys iš dalies oksiduojasi. Tai yra susidaro cheminės reakcijos zona ir sudegimo zona, kurioje toliau oksiduojasi nevisiškai sudegę produktai.

Dėl nevisiško sudegimo ir dėl platesnės cheminės reakcijos zonos difuzinės liepsnos temperatūra yra žemesnė už kinetinės liepsnos temperatūrą. Todėl padidėja ir šilumos nuostoliai iš degimo zonos. 1.3 pav. pateiktas apytikslis difuzinės ir kinetinės liepsnų temperatūrų laukas.



1.3 pav. Laminarinės kinetinės ir difuzinės liepsnų temperatūrų pasiskirstymas

čia δ_f – fizikinė degimo zona;
 δ_{ch} – cheminė degimo zona;
 δ_p – pašildymo zona;
 T_{uz} – užsiliepsnojimo temperatūra;
 T_d – degimo temperatūra.

Išvertinus, kad degimo produktų šiluminės talpos mažai skiriasi nuo pradinių medžiagų šiluminių talpų, degimo temperatūrą galima apskaičiuoti pagal formulę:

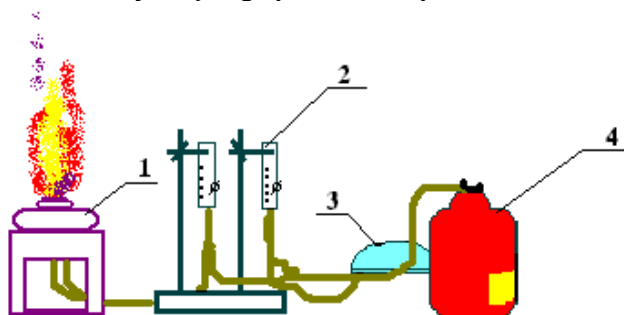
$$T_d = T_0 + \frac{Q_{d.pr} - Q_{pr}}{\sum V_i \cdot c_{pi}}, \quad (1.4)$$

čia T_d – degimo temperatūra, K;
 T_0 – pradinė degiosios medžiagos ir oksidatoriaus temperatūra, K;
 $Q_{d.pr}$ – šilumos kiekis, kuris sunaudojamas degimo produktų įkaitinimui, kJ/mol, kJ/kg, kJ/m³;
 Q_{pr} – šilumos kiekis, kuris patenka į degimo zoną su pradinėmis medžiagomis, kJ/mol, kJ/kg, kJ/m³;
 V_i – degimo produktų i-tojo komponento tūris, kmol/kmol, m³/kg, m³/m³;
 c_{pi} – degimo produktų i-tojo komponento šiluminė talpa, esant T_d , temperatūrai, kJ/(kmol K), kJ/(m³ K).

Apibūdinus įvairius degimo režimus, galima apibendrinti degimo procesą. Gaisro metu degimo procesas yra apibūdinamas pagal cheminės reakcijos zonos plitimo mechanizmą (deflagracinis ar detonacinis), pagal jo kinetinius parametrus (difuzinis ar kinetinis degimas), pagal cheminių reakcijų prigimtį jų veikimo zonoje (homogeninės ar heterogeninės) ir pagal dujų dinaminius degimo parametrus (laminarinis ar turbulentinis).

Darbo eiga

1 užduotis. Naudodami Biunzeno degiklį ir keisdami dujų ir oro išėigą, ištirkite liepsnos rūšis. Bandymo įranga pateikta 1.4 pav.



1.4 pav. Bandymo atlikimo įranga:

1 – Biunzeno degiklis; 2 – rotametas; 3 – oro kompresorius; 4 – dujų balionas

Darbo atlikimo tvarka

Imamas Biunzeno degiklis. Dujų rotametu (2) išmatuojama minimali dujų išėiga, kurią nurodo dėstytojas. Dujos uždegamos. Užrašoma dujų išėiga ir piešiamas liepsnos konuso paveikslas, pažymima liepsnos fakelo spalva ir storis (vizualiai). Nustatoma liepsnos rūšis.

Palaispsniui didinant dujų išėigą, yra stebima, kokiai dujų išėigos reikšmei esant laminarinio degimo režimas virsta turbulentine. Piešiamas liepsnos fakelo paveikslas ir pagal (1.2) formulę apskaičiuojamas Reinoldso koeficientas Re , kuriam esant įvyko dujų dinaminio degimo režimo pasikeitimas (gamtinių dujų kinematinio klampumo koeficientas 20°C temperatūroje lygus $16,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). Vidutinis srauto greitis v apskaičiuojamas pagal dujų debitą V_d :

$$v = \frac{V_d}{f} . \quad (1.5)$$

čia v – vidutinis srauto greitis, m/s ;

V_d – dujų debitas, m^3/s ;

f – degiklio skerspjūvio plotas, m^2 .

Bandymas kartojamas 3 kartus.

Dujų ir oro rotametrais išmatuojama dujų ir oro išėiga, kurią nurodo dėstytojas. Nustatoma liepsnos rūšis. Užrašoma dujų ir oro išėiga ir piešiamas liepsnos konuso paveikslas, pažymima liepsnos fakelo spalva ir storis (vizualiai). Bandymas kartojamas 3 kartus.

Duomenys surašomi į lentelę.

2 užduotis. Pagal (1.4) formulę apskaičiuokite degimo temperatūrą.

Savikontrolės klausimai

1. Kokį procesą vadiname degimu?
2. Nuo ko priklauso degimo proceso intensyvumas?
3. Kokie yra degimo režimai?
4. Kokiam degimo režimui yra priskiriamas smilkimas?
5. Kuo skiriasi kinetinis degimo režimas nuo difuzinio?
6. Kokie pagal dujų srautų judėjimą yra degimo režimai?
7. Koks kriterijus apibūdina turbulentinį degimą?
8. Kokie degimo parametrai keičiasi priklausomai nuo degimo režimo?
9. Kuo skiriasi kinetinės ir difuzinės liepsnos fakelai?
10. Kaip yra apskaičiuojama degimo temperatūra?