

KIEGÉSZÍTÉSEK A KÖZVETLEN BEFECSKENDEZÉSŰ FELTÖLTÉSES DIESEL HAJÓMOTOROK GYULLADÁSI ÉS ÉGÉSFOLYAMATAIHOZ

LOSONCI PÁL*

[Beérkezett: 1981. június 24-én]

Az osztatlan égésterű többsugaras fűvókával üzemelő Diesel hajómotorok égésterében lezajló keverékképzési-, gyulladási- és égésfolyamatokra vonatkozó mai elméletek is meglehetősen bonyolultak. E cikk kísérletet tesz e bonyolultságok részleges feloldására, kihangsúlyozva a tüzelőanyag-részecskéknek a nagysebességű felmelegedési folyamatában jelentős szerepet játszó világító láng hősugárzó hatását, a keverékképzés folyamatában lényegesnek ítéltető nagysebességű párolgási folyamatot, az ún. gőzrobbanást, ami a keverékképzési és égési folyamatokat önfenntartóvá teszi.

Bevezetés

Sajnos, a Diesel-motorok égésterében lejátszódó keverékképzési, gyulladási és égésfolyamatokat részleteiben ma sem ismerjük, az új motor tervezésekor az égéstér, a befecskendező rendszer kialakítása főleg kísérleti úton történik. Kétségtelen tény, hogy a megelőző évtizedek kutatási, kísérletezési erőfeszítései, minőségileg sok újat eredményeztek, a keverékképzési-, a gyulladási- és égési folyamatok megismerése területén. Ennek ellenére még mindig vannak a keverékképzésnek, a gyulladásnak és égésnek olyan részterületei, ahol a jelenleg ismert kutatási eredmények, megalkotott elméletek kiegészítésre, esetleg pontosításra szorulnak. Ilyen részterületnek ítéltető a közvetlen befecskendezésű Diesel-motorban kialakuló égés folyamatában az égés önfenntartó tulajdonsága, különösképpen az égés utolsó fázisában akkor, amikor az égési levegő oxigén koncentrációja a minimumhoz tart és a még el nem égett tüzelőanyag részecskék, párák egyre nehezebben jutnak szabad oxigén molekulához.

Jelen cikk rövid áttekintést kíván nyújtani a közvetlen befecskendezésű Diesel *kisfordulatszámú hajómotorok* égésterének gyulladási és égési sajátosságairól, a kapcsolatos kísérleti megfigyelésekről, eredményekről, valamint a kísérleti mérések eredményeiből levonható következtetésekről.

* Losonci Pál, 1118 Budapest, Otthon u. 37.

**1. Rendezett légmozgással nem rendelkező
közvetlen befecskendezésű égésterek néhány gyulladási
és égési sajátossága, különös tekintettel a kis fordulatszámra**

Kiindulásképpen először hasonlítsuk össze egy nagyfordulatszámú gyorsjárású és egy kisfordulatszámú középgyors járású hajó Diesel-motor aktuális paramétereit. Az összehasonlítást az 1. táblázat tartalmazza.

Az 1. táblázat adataiból kiemelhető:

- a kisfordulatszámú Diesel-motorok égésterai többszörösen nagyobbak, mint a nagyfordulatszámú Diesel-motorok égésterai,
- az egy ciklus alatt befecskendezett tüzelőanyag-mennyiség is többszörösen nagyobb,
- az égéstérben sokkal nagyobb távolságra kell eljuttatni a tüzelőanyagot,
- többszörösen nagyobb térfogatban kell a jó keverékképzést megvalósítani,
- a nagyobb mennyiségű befecskendezett tüzelőanyag elégetéséhez, többszörösen hosszabb idő áll rendelkezésre,
- többszörösen hosszabb a tüzelőanyag geometriai befecskendezési ideje.

A fentiekből egyértelműen következik:

a) A nagyobb távolságra történő tüzelőanyag-befecskendezés igénye megköveteli a nagyobb behatolási mélységű tüzelőanyag-sugár létrehozását. A nagyobb behatolási mélységű tüzelőanyag-sugár átlagosan nagyobb mennyiségben tartalmaz nagyobb méretű tüzelőanyag-részecskéket. Nehezebb megvalósítani a nagyobb méretű tüzelőanyag-részecskéknek a kedvező elpárologtatását, a gyújtását és a füstmentes elégetését. A nagyobb méretű részecskék még osztódásuk után is nagyobb valószínűséggel juthatnak a viszonylag hidegebb égéstérfalakra, ahol lecsapódnak és veszteséget okoznak.

b) A rendezett légmozgással nem rendelkező, közvetlen befecskendezésű kisfordulatszámú Diesel-motorok esetében, különösen a befecskendezés utolsó fázisában — amikor az égési levegő oxigénkoncentrációja a minimumhoz tart

1. táblázat

N ^o	Fordulatszám f/perc	Dugattyú- közép- sebesség m/s	Kompresz- zió viszony ϵ	Égéstér térfogat cm ³	Tüzelő- anyag ciklus adagja cm ³	Geo- metriai befecskend. idő 10 ⁻³ s	Effektív közép- nyomás bar
1.	1800	12,6	12	455	0,36	1,4	9,0
2.	400	6,0	12	3200	2,5	11,25	10,7

Az 1. és 2. motorjellemzők közötti viszonyszámok értékei:

1/2	4,5	2,1	1	0,14	0,144	0,1244	0,84
-----	-----	-----	---	------	-------	--------	------

— a hengerbe érkező tüzelőanyag-részecskék, illetve párák elkeverése és füstmentes elégetése jelent nehezebb feladatot.

c) A párolgási, gyulladási és égési folyamatok lezajlását kedvező irányban befolyásolja a többszörösen nagyobb rendelkezésre álló idő.

d) A hengerbe érkező első tüzelőanyag-részecskék párolgása, gyulladása, lényegesen kedvezőbb körülmények között megy végbe, a rendelkezésre álló égési levegőnek a többszörösen nagyobb mennyisége és a nagyobb hőtartalma miatt.

2. Vizsgálatok és kísérleti megfigyelések hajó Diesel-motorokon

A vizsgálatokhoz és a kísérletekhez rendelkezésre bocsátott motor főbb adatai:

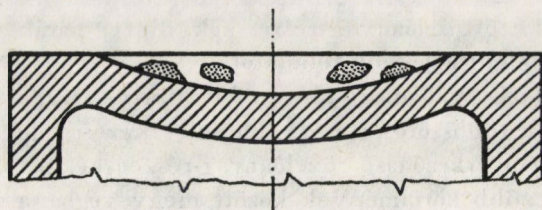
Hengerek száma:	$z = 8$
Effektív tartós teljesítmény:	$P_e = 736 \text{ kW (1000 LE)}$
Tartós üzemi fordulatszám:	$n = 400 \text{ f/min}$
Teljesítmény 1 órás túlterhelésnél:	$P'_e = 810 \text{ kW (1100 LE)}$
Túlterhelési fordulatszám:	$n' = 412 \text{ f/min}$
Fajlagos tüzelőanyagfogyasztás:	$b_e = 231 \text{ g/kWxh; } +5,5\% \text{ (170 g/LExh; } +5,5\%)$
Furat:	$D = 315 \text{ mm}$
Lökét:	$S = 450 \text{ mm}$
Összlökettérfogat:	$V_\delta = 281 \text{ l}$
Kompresszió viszony:	$\varepsilon = 10,8$
Effektív középnyomás:	$p_e = 8,0 \text{ bar}$
Feltöltő levegő nyomása (túlnyomás):	$p_f = 0,4 \text{ bar}$
Égési végnyomás:	$p_\varepsilon = 53 + 2 \text{ bar}$
Kompresszió végnyomás:	$p_c = 36 \text{ bar}$
Égéstér rendszere:	Osztatlan korongalakú, a könnyűfém dugattyútetőben fél lencseformájú teknővel, közvetlen befecskendezéssel, rendezett légmozgás a hengerben nem volt.
Befecskendező fúvóka típusa:	Bosch DL T 183 ($6 \times 0,4 \times 120^\circ$)
Befecskendező szivattyú típusa:	Bosch PF 1 W 190; hengerenként önálló szivattyú
Feltöltés rendszere:	lüktető, két-két henger közös csőbe kapcsolva. Motorra szerelve 1 db BBC VTR 320 típusú turbófeltöltő. Levegő-visszahűtés nincs.
Szelepek száma:	egy szívó-, egy kipufogó szelep
Szelepösszenyitás mértéke:	$\Delta\varphi = 150 \text{ főtengely fok}$
Fajlagos kenőolaj-fogyasztás:	$b_{ek} = 4,08 \text{ g/kWxh; } +10\%$
Dugattyú középsebesség:	$c_k = 6 \text{ m/s}$

2.1. A motor üzeme során szerzett — a tüzelőanyag gyulladása és égése témakörébe tartozó — tapasztalatok és levont következtetések

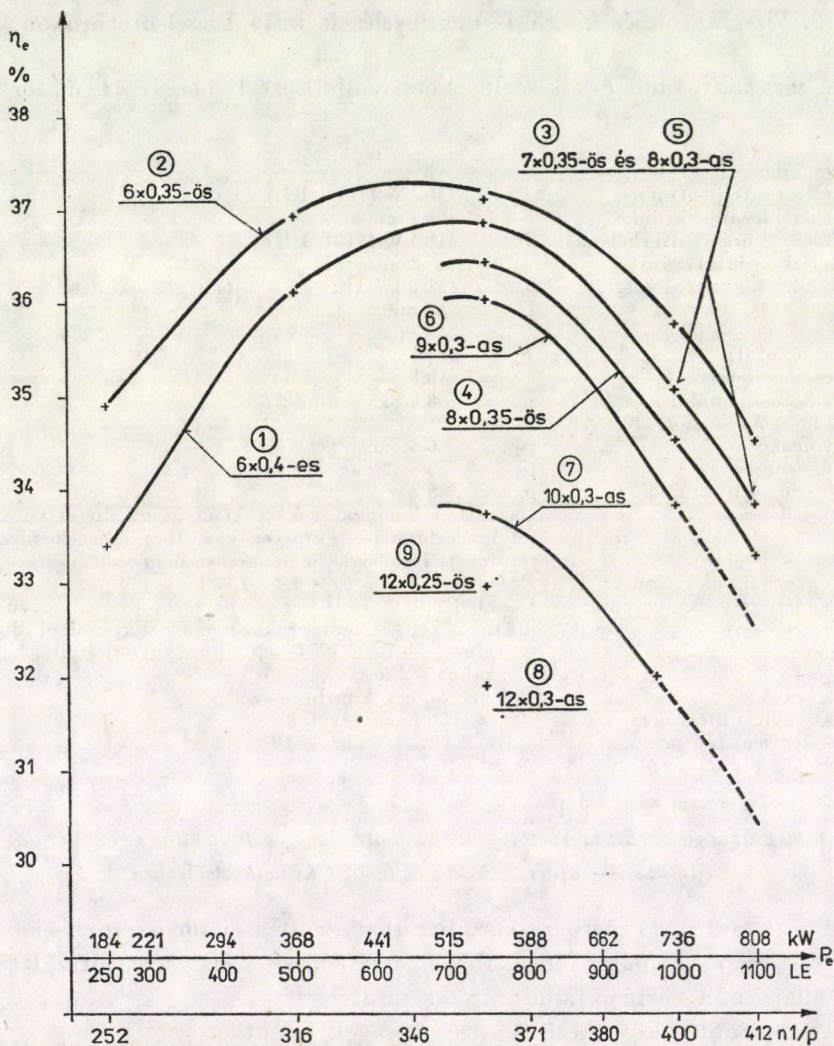
A vizsgálatok kezdeti szakaszában sor került a motor üzemelés közbeni megfigyelésére és a motor fontosabb alkatrészeinek szétszerelés után letisztítatlan állapotban történő tanulmányozására.

A motornál a következő rendellenességek jelentkeztek:

— a motor a tartós üzemi teljesítményen és még részterhelési állapotban is mérsékelten füstölt,



1. ábra. Kokszdombocskák a dugattyútetőn



2. ábra. A motor effektív hatásfokának változása az eredeti és kísérleti fűvőkákkal történt mérések során

— a dugattyútetőn a befecskendező fúvóka furatszámával megegyező számú kokszdombocskák képződtek (1. ábra).

A felsorolt rendellenességekből az volt a levonható következtetés, hogy vizsgálatokat kell végezni

— az égési légviszonyokra és

— a motor keverékképzési és égési fázisaira vonatkozóan.

A motor „ m_{ϵ} ” égési és „ m_i ” teljes légviszonyát $P_{\epsilon} = 736 \text{ kW}$ és $n = 400 \text{ f/p}$ jellemzőknél vizsgáltuk, már előzetesen elvégzett mérések eredményei alapján. E részvizsgálatok a teljes légviszonyra

$$m_i = 2,45,$$

az égési légviszonyra — közelítő számítás alapján —

$$m_{\epsilon} = 1,75 - 1,8$$

értéket adtak.

E számszerű eredmények alapján égési léghiányból eredő füstölésre nem lehetett gondolni.

2.2. A tüzelőanyag befecskendező-rendszer elemeinek vizsgálata

A 2.1. pontban leírtak alapján égési rendellenességekre lehetett következtetni. Mivel a befecskendezés az égést jelentősen befolyásolja, célszerűnek látszott felülvizsgálni a befecskendező fúvókának az égéstérhez, illetve az égéshez való illeszkedését.

Erre alapozva több különböző típusú fúvóka beszerzésére és kísérleteire került sor.

2.3. A kísérletek új típusú befecskendező fúvókái és a végrehajtott mérések eredményei

A fúvókakísérletekhez 8 féle, az alapfúvókától eltérő geometriai jellemzőkkel rendelkező fúvókát alkalmaztunk. E fúvókátípusok főbb geometriai jellemzőit a 2. táblázat tartalmazza.

Az 1. sz. fúvóka az alapmotor eredeti alkatrésze volt.

A 2. táblázatban felsorolt fúvókákkal végrehajtott kísérletek eredményeit a 2. ábra mutatja.

A fúvóka kísérletek során állandó értékű volt:

— a befecskendezési nyitónyomás,

— az előbefecskendezési szög,

— a befecskendezés geometriai törvényszerűsége.

A fenti paraméterek állandósága mellett, a befecskendezés más jellemzői természetesen változtak.

2. táblázat

A kísérleti fűvókák geometriai jellemzői

S. sz.	Fűvókátípus	Furatok összekeresztmetszete		Furatok elrendezése
		mm ²	%-os aránya	
1.	6 × 0,4 × 120	0,756	100	szimmetrikusan egy kúp-paláston
2.	6 × 0,35 × 120	0,576	76	szimmetrikusan egy kúp-paláston
3.	7 × 0,35 × 120	0,6723	89	szimmetrikusan egy kúp-paláston
4.	8 × 0,35 × 120	0,767	101	szimmetrikusan egy kúp-paláston
5.	8 × 0,30 × 120	0,564	75	szimmetrikusan egy kúp-paláston
6.	9 × 0,30 × 120	0,634	84	szimmetrikusan egy kúp-paláston
7.	10 × 0,30 × 120	0,705	92	szimmetrikusan váltakozva két kúppaláston
8.	12 × 0,30 × 120	0,846	112	szimmetrikusan váltakozva két kúppaláston
9.	12 × 0,25 × 120	0,588	78	szimmetrikusan váltakozva két kúppaláston

A fűvókák egyes jellemző számjegyeinek értelmezése:

- az első számjegy a furatok darabszáma
- a második számjegy a furat átmérője mm-ben
- a harmadik számjegy a befecskendezés kúpszöge (szögfokban)

2.4. A kísérleti eredményekhez kapcsolódó megállapítások, feltevések

— az effektív hatásfok legkedvezőbb értékét a 2. sz. fűvókánál sikerült elérni. A motor füstölése és a dugattyútetőn a kokszdombocskák képződése a teljes üzemi tartományban megszűnt. Ennek alapján kimondható, hogy rendezett légmozgással nem rendelkező középgyors járású közvetlen befecskendezésű hajó Diesel-motornál kiválasztható egy optimális fűvóka, amely jó hatásfokú füstmentes égést garantál;

— a fűvóka geometriai összekeresztmetszetének változása nem gyakorolt egyértelmű hatást az effektív hatásfokra,

— a furatok darabszámának növelése kezdetben mérsékelt, majd rohamos effektív hatásfok-romlást eredményezett. Ezért az optimális effektív hatásfok elérése érdekében kiválasztható egy optimális furatszámmal rendelkező fűvóka,

— a furatok átmérőjének csökkenése a 2. sz. fűvóka esetében javította az effektív hatásfokot, azonban amint az átmérő csökkenés együtt járt a furatok darabszámának növelésével, az effektív hatásfok számottevő csökkenést mutatott.

A fentiek alapján megállapítható, hogy a középgyors járású, közvetlen befecskendezésű, többsugaras fúvókával üzemelő, feltöltéses hajó Diesel-motoroknál, ahol az égéstérben nincs rendezett légmozgás, nem szabad törekedni arra, hogy a keverékképzés során a lehető legegyszerűbben osszunk el az égéstérbe juttatott tüzelőanyagot.

Ez a megállapítás teljesen ellentmond a többsugaras fúvókával üzemelő Diesel-motor égéstérben végbemenő keverékképzési és égési folyamatok klaszikus szemléletének.

2.5. Más motorokon végrehajtott fúvókakísérletek során szerzett tapasztalatok

2.5.1. Az M 50-F típusú többcélú mechanikus feltöltéses közvetlen befecskendezésű Diesel-motor kísérleten szerzett tapasztalatok:

A motor főbb adatai

Effektív tartós teljesítmény:	$P_e = 736 \text{ kW}$
Tartós üzemi fordulatszám:	$n = 1700 \text{ l/p}$
Teljesítmény 1 órás túlterhelésnél:	$P'_e = 808 \text{ kW}$
Túlterhelési fordulatszám:	$n' = 1800 \text{ l/p}$
Fajlagos tüzelőanyag-fogyasztás:	$b_e = 258 \text{ g/kWxh}$
Hengerek száma és elrendezése:	$2 \times 6 \text{ V}$

$D = 180 \text{ mm}$
$S = 200; 209,8 \text{ mm}$
$V_{\sigma} = 62,4 \text{ l}$
$\varepsilon = 12,2$
$p_e = 8,3 \text{ bar}$
$p_f = 0,65 \text{ bar}$ (túlnyomás)
$p_i = \text{nem ismeretes}$
$p_c = 51 \text{ bar}$

Égéstér rendszere:

osztatlan, Hesselman égéstér, közvetlen befecskendezéssel, rendezett légmozgás a hengerben nincs.

Feltöltés rendszere:

mechanikus, levegő visszahűtés nincs.

Szelepek száma:

két szívó, két kipufogó szelep

Dugattyú középsebesség:

$c_k = 12 \text{ m/s}$

Befecskendező fúvóka:

$8 \times 0,35 \times 140^\circ$

Szelepösszenyitás:

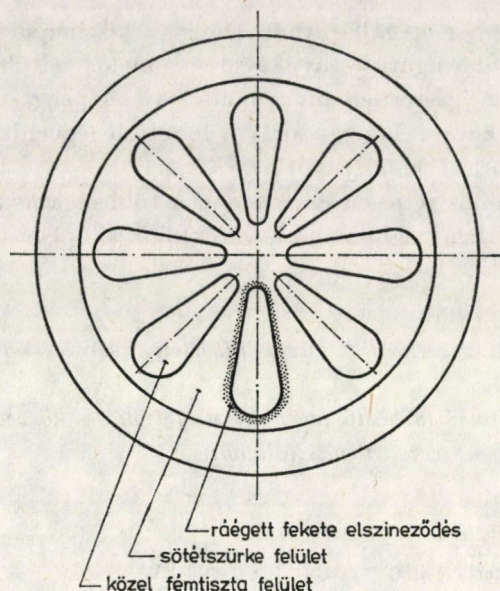
$\Delta\varphi = 100 \text{ főtengely fok}$

E motoron végrehajtott befecskendező fúvókakísérletek egyértelműen azt mutatták, hogy a legkedvezőbb eredményeket a $8 \times 0,35 \times 140^\circ$ -os fúvóka szolgáltatta. Ekkor a motor szemmel látható füstölés nélkül üzemelt és a kipufogó gázok hőmérséklete a legkisebb volt.

Ebben az esetben a makrokeverék jósági száma [9]:

$$\frac{V_c}{V \text{ sugár összes}} = 5,8 \text{ értékre adódott.}$$

A dugattyútetőn a csúcspól kiindulva ráégett, nem egyenletes fekete elszíneződések jelentkeztek, a fúvóka 8 db. sugarának irányában (3. ábra). Megállapítható volt, hogy a sugarakba befecskendezett tüzelőanyag egy része a dugattyú-



3. ábra. A dugattyútetőn keletkezett elszíneződések vázlata

tetőre kenődik fel, ott elpárolog, kis mennyisége esetleg krakkolódik, de emellett is füstmentesen ég el. Megvizsgálva a sugarak és a dugattyútető geometriai helyzetét, abból az tűnt ki, hogy a tüzelőanyag-részecskék az ún. „hideg” befecskendezési pályán haladva nem juthatnak közvetlenül a dugattyútetőre. A dugattyútetőn keletkezett színeződésekből arra a következtetésre kellett jutni, ezek csakis azáltal keletkezhetnek, hogy a befecskendezés előrehaladottabb fázisában — amikor a dugattyú még a felső holtpont környezetében tartózkodik — a tüzelőanyag égése során a sugarak eredeti térfogatuk 3—4-szeresére is terjeszkednek. Ezzel a dugattyú közelében haladó tüzelőanyag-részecskék bizonyos mennyiségének a pályája olymértékben változik meg, hogy azok felkenődnek a forró dugattyútetőre és ott elpárolognak és elégnak, miközben az említett elszíneződést okozzák.

2.5.2. A 6LD 315 RNF típusú Diesel hajómotor kísérleteinél szerzett tapasztalatok

Hasonló jelenség volt észlelhető a 2. pontban leírt motorcsalád nagyföltöltésű egységénél is.

E motor főbb adatai a következők voltak (csak az eltéréseket soroljuk fel):

A típus jelzése:	6 LD 315 RNF
Hengerszám:	$z = 6$
Fajlagos tüzelőanyagfogyasztás:	$b_e = 209 \text{ g/kWxh}$
Összlökettérfogat:	$V_\delta = 211 \text{ l}$

Kompresszióviszony:	$\varepsilon = 12$
Effektív középnyomás	$p_e = 10,7 \text{ bar}$
Feltöltő levegő nyomása: (túlnyomás)	$p_f = 0,67 \text{ bar}$
Égési végnyomás:	$p_i = 88 \text{ bar}$
Kompresszió végnyomás	$p_c = 49 \text{ bar}$
Égéstér rendszere:	osztatlan, Hesselman közvetlen befecskendezéssel, rendezett légmozgás a hengerben nem volt.
Befecskendező fúvóka típusa:	Bosch $6 \times 0,5 \times 120^\circ$
Befecskendező szivattyú típusa:	Bosch PF 1W 220, hengerenként önálló szivattyú
Feltöltés rendszere:	lűktető, három-három henger közös kipufogó csőbe kapcsolva, motorra szerelve 1 db. Napier MS/HP 204 tip. turbófeltöltő. Levegő visszahűtés: $\Delta t = 40^\circ \text{C}$
Szelepek száma:	két szívó, két kipufogó szelep
Szelepösszenyitás mértéke:	$\Delta \varphi = 110$ főtengely fok

E motornál a makrokeverék jósági száma: [9]

$$\frac{V_c}{V. \text{ sug. } \ddot{o}.} = 12 \text{ értéket ért el.}$$

A következőkben tekintsük át az egyes fizikai állapotjelzők változásait, amelyek egyrészt a hengertöltetnél, másrészt a befecskendezett tüzelőanyagnál végbemennek.

3. A hengertöltet és a befecskendezett tüzelőanyag egyes fizikai állapotjelzőinek változása a befecskendezés és égés során

A befecskendezés és égés tartama alatt a hengertöltet és a tüzelőanyag-részecskék fizikai jellemzőiben változások sorozata következik be [1], [2].

Kövessük nyomon e változásokat.

3.1. A hengertöltet fizikai jellemzőinek változása

A hengertöltet átlagos nyomásának változása mérhető és számítható, az átlagos hőmérsékletének változása elegendő pontossággal számítható.

A 2.5.2. pontban bemutatott nagyfeltöltésű hajó Diesel-motorra vonatkozóan megbízható adatok a 4. ábrán láthatók [5].

A keverékképzés során figyelembe kell venni a hengertöltetben fellépő következő mozgásokat, változásokat:

— a szívás üteme alatt keletkezett és a befecskendezés és égés fázisában még meglevő rendezetlen örvénylő mozgást,

— a hengertöltetnek a befecskendezett tüzelőanyag-részecskék által előidézett bizonyos mértékű helyi mozgását,

— a gyulladás pillanatától keletkezett és a tartós, folyamatos égés során felerősödött rendezetlen belső áramlásokat (turbulencia).

A fenti állapotjelzőknek és jellemzőknek a változásával kapcsolatban meg kell jegyezni, hogy a hengertérben a gyulladási és égési centrumokban és közvetlen környezetükben az átlagos értékekhez képest — rövid időre — lényegesen nagyobb helyi nyomás-, hőmérséklet- és sebességértékek alakulnak ki, majd az égés során folyamatosan és annak befejeztével az átlagos értékekre kiegyenlítődnek.

— A hengertöltet oxigénkoncentrációja az égés folyamán csökken és egy minimális értékhez konvergál.

— A gyulladás pillanatában megjelenik a világítóláng, ami hőszugárzás útján a tüzelőanyag-részecskéknek további számottevő hőfelvételt tesz lehetővé.

3.2. A tüzelőanyag-részecskékben végbemenő változások

A befecskendezés folyamán a hengertérbe juttatott tüzelőanyag-részecskék minden időpillanatban más-más állapotú közegen haladnak át [1].

A 4. ábrát vizsgálva látható, hogy a hengertérbe befecskendezett tüzelőanyag-részecske a megtett útja során egyre növekvő nyomású (sűrűségű), hőmérsékletű levegővel, gázzal érintkezik, miközben sebessége számottevően csökken. A töltet növekvő nyomásának és növekvő hőmérsékletének hatására a tüzelőanyag-részecskékben is nő a nyomás és a hőmérséklet.

A gyulladás, folyamatos égés pillanatától a töltet nyomása és hőmérséklete meredeken emelkedik.

A töltet nyomása, a legnagyobb értékének elérése után meredeken csökken, miközben a töltet hőmérséklete még tovább emelkedik, majd tartósan közel állandó értékre áll be. Jelentős csökkenés csak ezután következik, ami elsősorban a folyamatosan elégtő tüzelőanyag mennyiségének csökkenéséből és a töltet expanziójának növekedéséből ered. A rohamos nyomáscsökkenés a tüzelőanyag-részecskében is jelentkezik, miközben hőmérséklete emelkedik.

A tüzelőanyag-részecske a hengertérben megtett útja során a folyamatos és egyre növekvő hőfelvétel következtében felmelegszik és párolog.

A párolgás mértékét, törvényszerűségét a hőfelvételen kívül számottevően befolyásolják a tüzelőanyag fizikai jellemzői is.

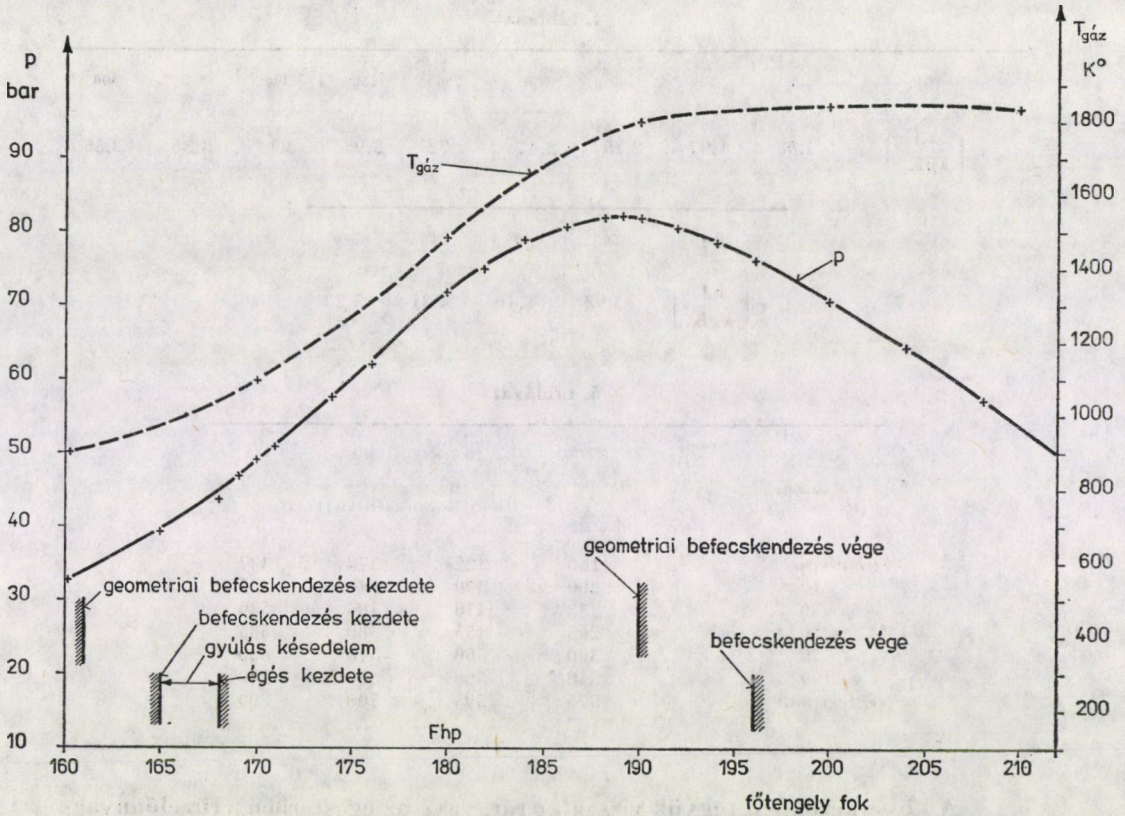
Tekintsük át a következő táblázatokat, amelyekben a tüzelőanyag egyes fizikai jellemzőinek változása látható részben (számított értékek [11]).

A *gázolaj sűrűsége* a nyomás növekedésével mérsékelten nő, a hőmérséklet növekedésével rohamosan csökken (3. táblázat).

A *gázolaj fajhője* a hőmérséklet növekedésével rohamosan növekszik (4. táblázat).

A *gázolaj desztillációs hőmérséklete* a nyomás növekedésével rohamosan növekszik (5. táblázat).

A tüzelőanyag-részecske mérete, alakja az általa megtett út során folyamatos változáson megy keresztül. A részecske mérete az elpárolgás mértékétől



4. ábra. A hengertöltet nyomásának és hőmérsékletének változása a motor keverékképzési és égési fázisában

függően csökken, a felmelegedés mértékétől függően viszont növekszik. A befecskendezés első pillanataiban még meglévő, közel gömb alakja megváltozik, a nagyobb méretű részecskék útjuk során osztódnak.

A részecske felszínén a párolgás következtében az alakjától függő, változó vastagságú gőzréteg képződik.

3. táblázat

Hőmérséklet (C)	Nyomás (bar)	A gázolaj sűrűsége (kg/dm ³)			
		1	20	40	60
20		0,830	0,832	0,835	0,841
200		0,695	0,700	0,704	0,718
300		0,600	0,629	0,641	0,653
400		0,455	0,547	0,559	0,577

4. táblázat

(C)	0	20	100	150	200	250	300	350	400
$c \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right)$	1,88	1,97	2,26	2,47	2,72	2,93	3,14	3,35	3,56

t (C)	500	600	700	800
$c \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right)$	3,98	4,40	4,81	5,23

5. táblázat

Átdestillált térfogat (%)	Nyomás (bar)	1	20	40	60
	Destillációs hőmérséklet C				
első csepp		160	322	378	437
10		200	390	440	475
30		233	410	485	530
50		265	455	530	585
70		300	500	570	630
90		348	560	660	740
végforrpon		375	595	700	800

A következőkben tegyük vizsgálat tárgyává az égésterben a tüzelőanyag-részecske hőfelvételi viszonyait, figyelemmel arra, hogy a konvekciós hőfelvétel mellett, a világító láng megjelenésének pillanatától a sugárzás útján történő hőfelvételt külön tárgyaljuk. Elhanyagoljuk az égésteret határoló falaktól sugárzás útján felvett, illetve azoknak sugárzás útján átadott hőmennyiséget.

3.3. A tüzelőanyag-részecske hőfelvételi viszonyai

A tüzelőanyag-részecske konvekciós- és sugárzásos úton vesz fel hőt a környezetétől és párolgás útján bizonyos mennyiséget lead. A tüzelőanyag-részecske felmelegítésére fordított hőmennyiség:

$$Q_f = Q_k + Q_s - Q_p. \quad (kJ) \quad (1)$$

A tüzelőanyag-részecske a világító láng megjelenésének pillanatáig a munkaközegből csak konvekciós úton vesz fel számottevő hőt. A konvekciós hőfelvétel nagyságának a meghatározásához kiindulásul a következő ismert alapösszefüggést használjuk:

$$Q_k = \alpha_k A (t_g - t_{cs}) \tau. \quad (1)$$

A sugárzásos hőfelvétel közelítő értékének a meghatározásánál:

$$Q_s = \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_{cs} \cdot A \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{cs}}{100} \right)^4 \right] \cdot \tau \quad (2)$$

ismert összefüggésből indulunk ki [6].

A jelölések értelmezése:

- Q_f = a tüzelőanyag-részecske felmelegítésére fordított hőmennyiség (kJ)
 Q_k = a tüzelőanyag-részecskének a hengertöltetből konvekciós úton felvett hőmennyisége (kJ)
 Q_s = a tüzelőanyag-részecske által sugárzásos hőcserével felvett hőmennyiség (kJ)
 Q_p = a tüzelőanyag-részecskéből párolgással elvont hőmennyiség
 α_k = konvekciós hőátadási tényező (kJ/m² Kh)
 A = a tüzelőanyag-részecske hőátvevő felülete (m²)
 t_g = a hengertöltet átlagos hőmérséklete (C)
 t_{cs} = a tüzelőanyag-részecske átlagos hőmérséklete (C)
 τ = idő (10⁻³ s)
 σ = hősugárzási együttható [20,8 · 10⁻⁸ kJ/m²(K)⁴ h
 ε_1 = a sugárzó láng emissziós tényezője, számítva az $\varepsilon_1 = \varepsilon_0 (1 - e^{-k \cdot p \cdot l})$ összefüggéssel. [10]
 ε_{cs} = a tüzelőanyag feketeségi tényezője (felvéve 0,9-re)
 $T_{\phi,l}$ = a világító láng abszolút hőmérséklete (K)
 T_{cs} = a tüzelőanyag-részecske abszolút hőmérséklete (K)
 ρ_g = a hengertöltet sűrűsége (kg/dm³)
 k = $k(m, \Delta\varphi)$ értéke függ a légviszonytól (m) és a főtengely elfordulási szögétől ($\Delta\varphi$). [10., 4. ábra]
 p = nyomás az égéstérben (kg/cm²)
 l = közepes sugárhossz az égéstérben a következő formula szerint:
 $l = \frac{3,6 V}{A}$, ahol
 V = az égéstér pillanatnyi térfogata (m³)
 A = az égéstér pillanatnyi határoló felülete (m²)

3.3.1. A konvekciós hőátvitel

Az (1) egyenlet tényezői a befecskendezés fázisában állandó jelleggel változnak, így:

— a *csepp átlagos hőmérséklete* a megtett útja során emelkedő tendenciát mutat. Miután a csepp különböző fizikai állapotú mikrokozmoszokban halad át, a tendencia megmaradása mellett a hőmérsékletének emelkedése a mikrokozmoszokban való áthaladásnak megfelelően más-más törvényszerűség szerint valósul meg;

— az elpárolgási folyamat kezdetéig a *gáz átlagos hőmérsékletének* változása a politropikus kompresszió törvénye szerint következik be. Ettől a pillanattól kezdve az *első gyulladási centrum megjelenéséig* a hőmérséklet-emelkedés más törvényszerűség szerint zajlik. Megint más törvényszerűség szerint változik a *gáz átlagos hőmérséklete* a gyulladás pillanatától a maximális hőmérséklet eléréséig, majd megint másképpen az expanziónak az égés végét jelentő szakaszáig;

— a *csepp átlaghőmérséklet* közvetlenül a felvett hőmennyiségtől és a párolgás során elvont hőmennyiségtől függ;

— a gáztól konvekciós úton átvett hőmennyiség az átvevő felület nagyságától A -tól is függ. Figyelembe véve, hogy a csepp a hengertérbe való bejutása pillanatától, hőmérsékletének növekedésével párolgásnak indul, ezért A értéke kisebb mértékben növekszik, mint amilyen mértékű növekedést a csepp hőmérséklet-emelkedésének a hatására bekövetkező térfogatnövekedéstől várni lehetne;

— a *csepp felülete függ a csepp alakjától*. A nagyobb cseppek osztódásának fázisában a felület nagysága állandó változáson megy keresztül. Változik a hőátvitel szempontjából aktív és kevésbé aktív felület is;

— a világító láng megjelenésével a sugárzó hőfelvétel hatására a csepp felülete még egy újabb törvényszerűség szerint változik és megint más törvényszerűség válik uralkodóvá, ha a csepp felszíné már lánggal ég. A csepp felszínén akkor minden bizonnyal kialakul a felszínhez közeli rétegek nagyon gyors felmelegedésének hatására egy, a forrási állapothoz hasonló jelenség. Az elpárolgás ezekből a rétegekből olyan nagy sebességgel történhetik meg, hogy a csepp több darabra esik szét, illetve „felrobban”. (Gőzrobbanás [9].)

— a *csepp párolgása* során a felszínen gőzburok képződik, amely csökkenti a konvekciós hőfelvételt;

— az α_k hőátadási tényező értéke a tüzelőanyag-részecskéknek a hengertérben megtett útja során, illetőleg az idő függvényében változik [1].

A változást előidéző fontosabb tényezők:

— a csepp mértékadó sebessége,

— a csepp mértékadó átmérője, alakja,

— a gőzburok vastagsága,

— a töltet sűrűsége,

— a részecske felszínének égése.

A fentiek figyelembevételével a tüzelőanyag-részecske konvekciós hőfelvételét a következő bonyolult függvénnyel jellemezhetjük:

$$Q_k = Q_k(A; \alpha_k; t_{cs}; t_g; \tau). \quad (3)$$

Ez az egyenlet azzal válik bonyolulttá, hogy A ; α_k ; t_{cs} ; t_g , egyrészt az időnek, τ -nak a függvénye, másrészt A ; és t_{cs} még Q_k -nak és a fajhőnek, c -nek is függvénye, azaz

$$A = A(Q_k; t_{cs}; \tau; c); \quad (4)$$

$$t_{cs} = t_{cs}(Q_k; \tau; \alpha_k); \quad (5)$$

illetve

$$\alpha_k = \alpha_k(A; \lambda; w; \rho_g; \delta_{gb}; \tau); \quad (6)$$

Esetünkben:

λ a levegő (gáz) hővezetési tényezője
 w a tüzelőanyagcsepp változó relatív sebessége
 δ_{pb} a tüzelőanyagcsepp palástja mentén kialakuló gőzburok vastagság
 ρ_g a hengertöltet sűrűsége.

Sajnos, meg kell állapítani, hogy a (3), a (4), az (5) és a (6) függvények ma még nem ismeretesek.

3.3.2. *A sugárzásos hőátvitel elemzése*

A befecskendezés kezdetétől az első égési centrumok, illetőleg a világító láng megjelenéséig terjedő idő csak egy töredéke a befecskendezés és égés összidejének [1]. A világító láng megjelenésével a tüzelőanyag-részecskéknek egy másik hőleadó forrás is rendelkezésre áll, a világító láng hőszugárzása.

A tüzelőanyag-részecske hőszugárzás útján történő hőfelvételét — a (2) összefüggés figyelembevételével — a következő függvénnyel jellemezhetjük:

$$Q_s = Q_s(A; T_{cs}; \tau).$$

Ez az összefüggés azáltal válik bonyolulttá, hogy A és T_{cs} is Q_s -nek függvénye, továbbá T_{cs} még külön a részecske c fajhőjétől is függ. A fajhő viszont T_{cs} értéktől függ.

Ez tovább bonyolítja a tüzelőanyag-részecske felmelegedési viszonyainak számítási eljárását. Ezekután, ha összevetjük a tüzelőanyag-részecskének a konvekciós és sugárzásos hőfelvételi viszonyait, megállapíthatjuk, hogy az egymástól többszörösen függő tényezők — a mai ismereteink szerint — nem teszik lehetővé a részecske felmelegedésének pontos számítását.

3.4. *A konvekciós és a sugárzásos hőfelvétel összevetése*

A 3.3.1. és a 3.3.2. pontokban külön taglalt konvekciós és sugárzásos hőfelvétel a keverékképzés és égés idejének a legfontosabb fázisában, a világító láng megjelenésének pillanatától az égés befejezéséig tartó szakaszában, nagyon bonyolult kapcsolattal együtt van jelen.

Vizsgáljuk meg 10, 20 és 30 μ átmérőjű tüzelőanyagcseppek felmelegedését a következő feltevésekkel:

- a csepp gömbalakú marad és nem veszi körül gőzburok,
- a csepp átmérője nem változik, tömege állandó,
- a gázhőmérséklet-változást figyelembe vesszük,
- a fajhőváltozást figyelembe vesszük,
- a hengertöltet hőmérsékletét a 4. ábra alapján:
 - a) növekvő tendenciával a gyulladás pillanatától,
 - b) a maximális állandó értékkel vesszük figyelembe

— a csepp hőmérsékletének kiinduló értékét minden esetben 150 °C-ra választjuk, az a) esetben α_k hőátadási tényezőt [1]:

$$\begin{aligned}\alpha_{10} &= 50,4 - 53,0 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^2\text{K h} \\ \alpha_{20} &= 25,2 - 26,3 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^2\text{K h} \\ \alpha_{30} &= 16,74 - 17,56 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^2\text{K h}\end{aligned}$$

értékkel, b) esetben, maximális hőmérséklet tartományban

$$\begin{aligned}\alpha_{10} &= 74,7 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^2\text{K h} \\ \alpha_{20} &= 37,3 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^2\text{K h} \\ \alpha_{30} &= 24,9 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^2\text{K h}\end{aligned}$$

értékekkel vesszük figyelembe [1], [6].

— elhanyagoljuk a töltet sűrűség-növekedéséből eredő α_k hőátadási tényező növekedését.

A felmelegedést $1,2 \times 10^{-3}$ s időtartam alatt vizsgáljuk, a láng hőmérsékletét számos mérés eredménye alapján 2500 K-ra választjuk [7], [10].

A számítást többszöri közelítéssel, a közepes hőmérsékleti értékkel és a hozzájuk tartozó közepes fajhő értékkel végeztük.

A számítás menete a következő volt: $0,1 \times 10^{-3}$ s rész idő-intervallumot volt célszerű kijelölni. A konvekciós és a sugárzásos hőfelvétel számítása párhuzamosan történt. A töltet hőmérsékletének növekedésével figyelembe vettük α_k növekedését is. A csepp kiinduló 150 C-os hőmérsékletének ismeretében meghatároztunk egy konvekciós és sugárzási hőmennyiséget, majd egy becsült fajhő értékkel a csepp felmelegedését közelítőleg számítottuk.

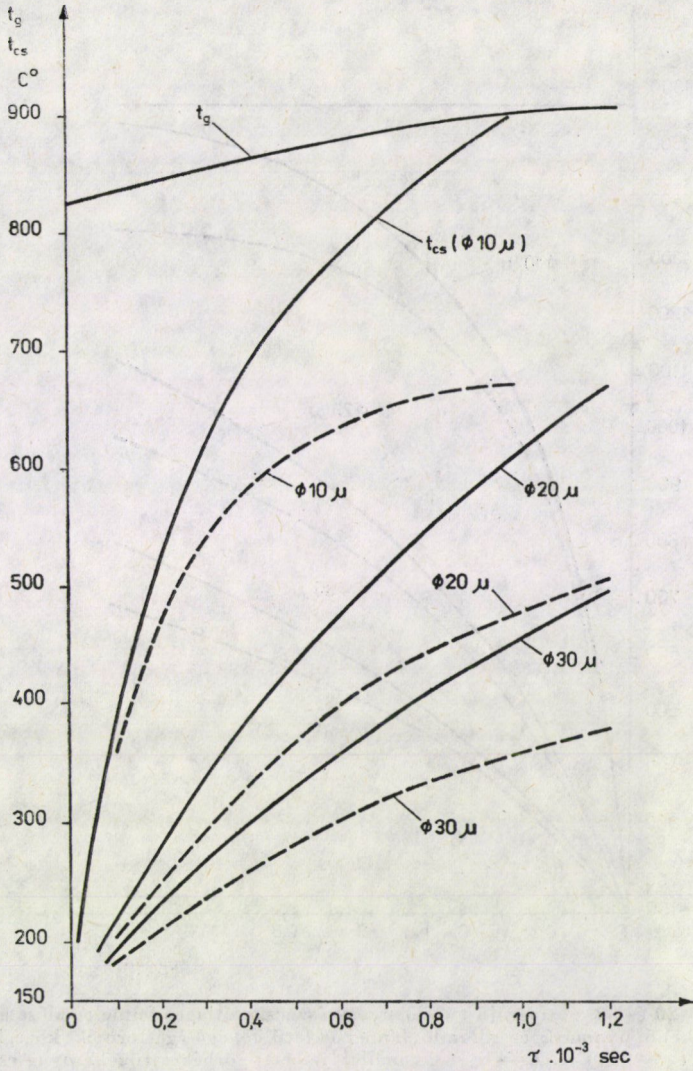
A számítást iterációs módszerrel javítottuk a megkívánt pontosság eléréséig.

Kettő, maximum három ilyen közelítéssel teljesen elegendő pontosságot értünk el.

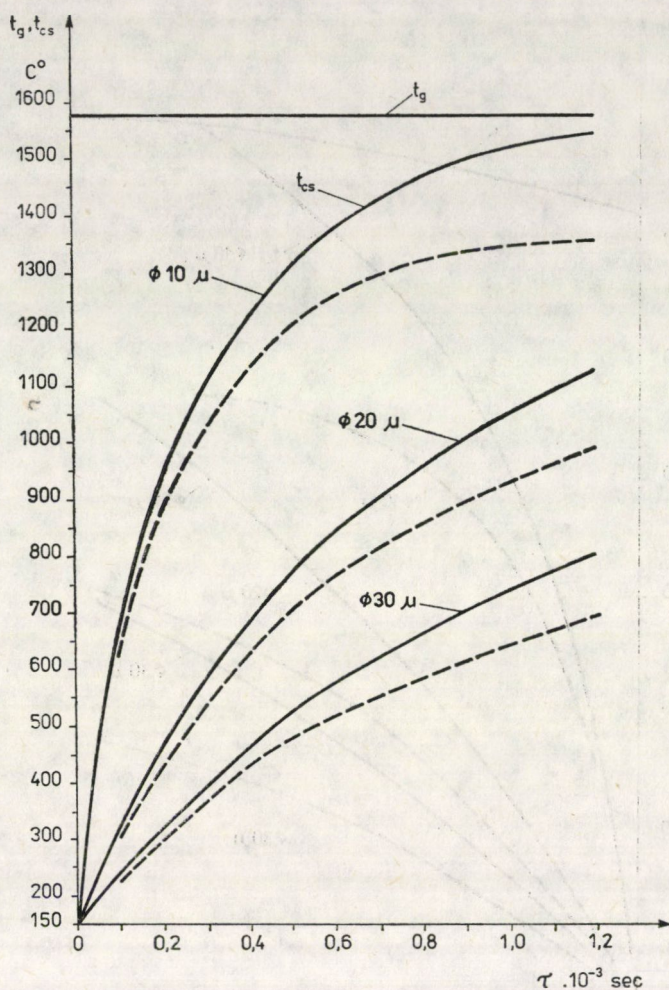
A középhőmérséklet ismeretében már adódott az intervallum végére vonatkozó tüzelőanyagcsepp számított hőmérséklete, amely egyúttal megadta a következő intervallum kezdetére vonatkozó tüzelőanyagcsepp közelítő hőmérsékletét.

A közelítő számítás eredményei az 5. és 6. ábrán láthatóak. A 3. táblázatban feltüntettük az 5. ábra felmelegedési törvényszerűségeihez figyelembe vett paraméterek felhasználásával közelítő számítás eredményeképpen nyert tüzelőanyag csepp elméleti párolgási időket [1].

Csepp méret	10 μ	20 μ	30 μ
Párolgási idő	$1 \cdot 10^{-3}$ s.	$3,3 \cdot 10^{-3}$ s.	$8 \cdot 10^{-3}$ s.



5. ábra. A 10-, a 20- és 30 μ átmérőjű tüzelőanyag-részecskék átlagos felmelegedésének változása az idő függvényében, növekvő nyomású és hőmérsékletű levegő-égéstermék közegben. A láng hőmérséklet $T_l = 2500$ K. A --- vonallal jelzett görbék a tüzelőanyag-cseppnek csak a konvekciós részfelmelegedését ábrázolják



6. ábra. A 10–20 és 30 μ átmérőjű tüzelőanyag-részecske átlagos felmelegedése az idő függvényében, csökkenő nyomású és állandó hőmérsékletű levegő-égéstermék közegben. A láng-hőmérséklet: $T_l = 2500$ K. A — — — vonallal jelzett görbék a tüzelőanyag-cseppeknek csak a konvekciós részfelmelegedését ábrázolják

4. A vizsgálatok alapján tett megállapítások

— A 20 μ és ennél nagyobb átmérőjű tüzelőanyag-részecskéknek az adott idő alatti felmelegedése lényegesen kisebb, mint a 10 μ átmérőjű részecskék felmelegedése azért, mert a 10 μ átmérőjű cseppeknek kedvezőbb a felület-tömeg arányuk, valamint az α_k hőátadási tényező értéke — a kisebb csepp-átmérő miatt — lényegesen nagyobb [1].

A tökéletesebb keverékképzés érdekében célszerű volna az, hogy a befecskendezés első fázisában kis méretű, gyorsan párolgó cseppeket állítsunk elő, ezzel a gyúlési késedelem csökken.

A tüzelőanyag öngyulladás utáni fázisokban, a töltet nyomásának rohamos növekedése következtében egyre nagyobb méretű tüzelőanyagcseppek előállítása a kívánatos. Ezek nagyobb behatoló képessége garancia lehet arra, hogy a tüzelőanyag-részecskék eljussanak az égéstérnek a fűvókától távolabbi résztérfogataiba is.

— A világító láng megjelenésének pillanatától a részecskék hőfelvétele számottevően megnő, a világító láng hőszugárzásának hatására.

— A $10\ \mu$ -nál nagyobb átmérőjű részecskék az égéstérbe való bejutásuk után feltehetőleg osztódnak.

Az osztódás főbb okai a következők:

— a nagysebességgel befecskendezett részecske palástja mentén kialakuló változó nyomások hatására a részecske deformálódik. A közel gömb alak nem tud tartósan fennmaradni,

— a részecske felmelegedése igen nagy sebességgel történik,

— a Diesel-olaj sokféle kisebb és nagyobb forráspontú komponensekből áll.

A nagy sebességű hőfelvétel következtében a kisebb forráspontú alkotók gőzbuborékai a cseppecskéből nagy sebességgel, robbanásszerűen igyekeznek távozni. Ezek felszaggatják a cseppecske felszínét és ezzel elősegítik az osztódást, így a cseppecske képes felrobbanni és kedvező keverékképzés esetén a „lángtengerben” tökéletesen elégni.

A tüzelőanyag-részecskének az átlagos felmelegedését vizsgálva (5. ábra) megállapítható, hogy a világító láng megjelenésének pillanatától a hőszugárzás útján felvett hőmennyiség a

$D = 10\ \mu$ átmérőjű részecskénél az összes átlagos felmelegedés 30,5%-át,

$D = 20\ \mu$ átmérőjű részecskénél az összes átlagos felmelegedés 31,2%-át,

$D = 30\ \mu$ átmérőjű részecskénél az összes átlagos felmelegedés 33,8%-át

adja.

Abban az esetben, ha a hengertöltet hőmérséklete elérte a legnagyobb értékét, a tüzelőanyag-részecske átlagos felmelegedéséből már kisebb hányad jut a hőszugárzásból adódó felmelegedésre (6. ábra).

Ebben az esetben:

$D = 10\ \mu$ átmérőjű részecskénél az összes átlagos felmelegedésnek 13,5%-át,

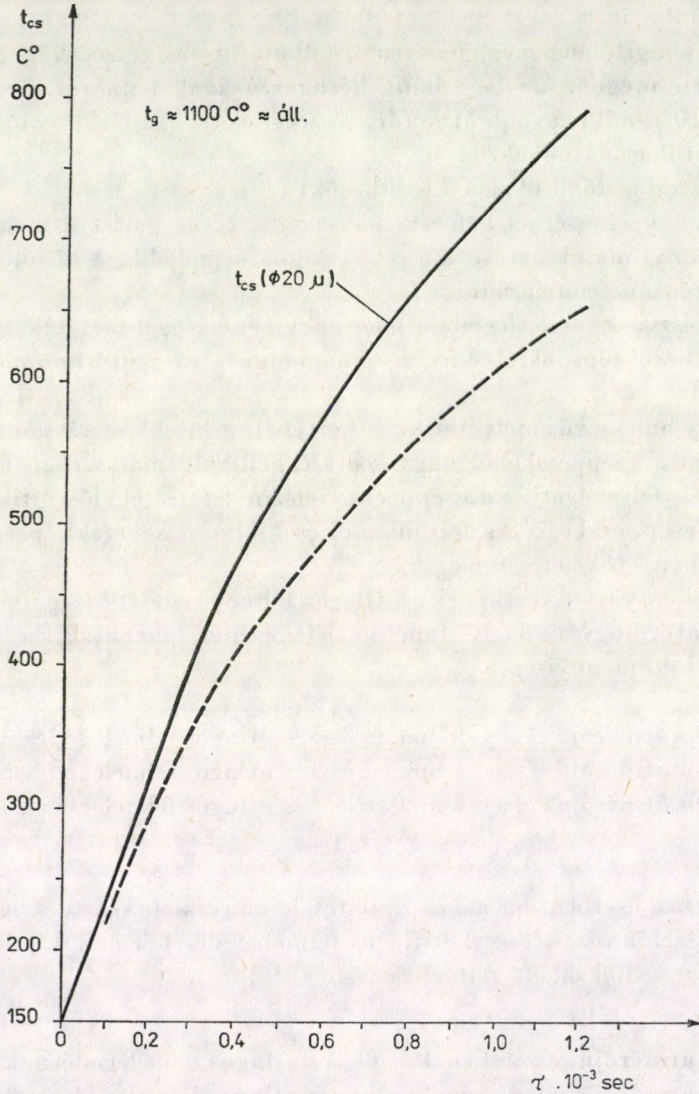
$D = 10\ \mu$ átmérőjű részecskénél az összes átlagos felmelegedésnek 14,2%-át,

$D = 30\ \mu$ átmérőjű részecskénél az összes átlagos felmelegedésnek 16,7%-át

adja a hőszugárzásból adódó felmelegedés.

A következőkben vizsgáljuk meg egy 20μ átmérőjű tüzelőanyag-részecske átlagos felmelegedését a világító láng kialvásának pillanatai előtt, feltételezve azt, hogy ebben a fázisban még létezik tüzelőanyag, csepp alakban.

A közelítő számításokat a 3. pontban körvonalazott feltételekkel végeztük. A gáz hőmérsékletét, annak kismértékű csökkenésére való tekintettel, állandó értékűre vettük fel. Továbbá



7. ábra. A 20μ átmérőjű tüzelőanyag-részecske átlagos felmelegedése az idő függvényében, csökkenő nyomású és közel állandó hőmérsékletű levegő-égéstermék közegben. A láng hőmérséklet: $T_l = 2500 \text{ K}$. A — — — vonallal jelzett görbe a tüzelőanyag-cseppnek csak a konvekciós részfelmelegedését ábrázolja

a [7] és [1] alapján: $T_l = 2500 \text{ K}$.

$p_g = \text{csökken,}$

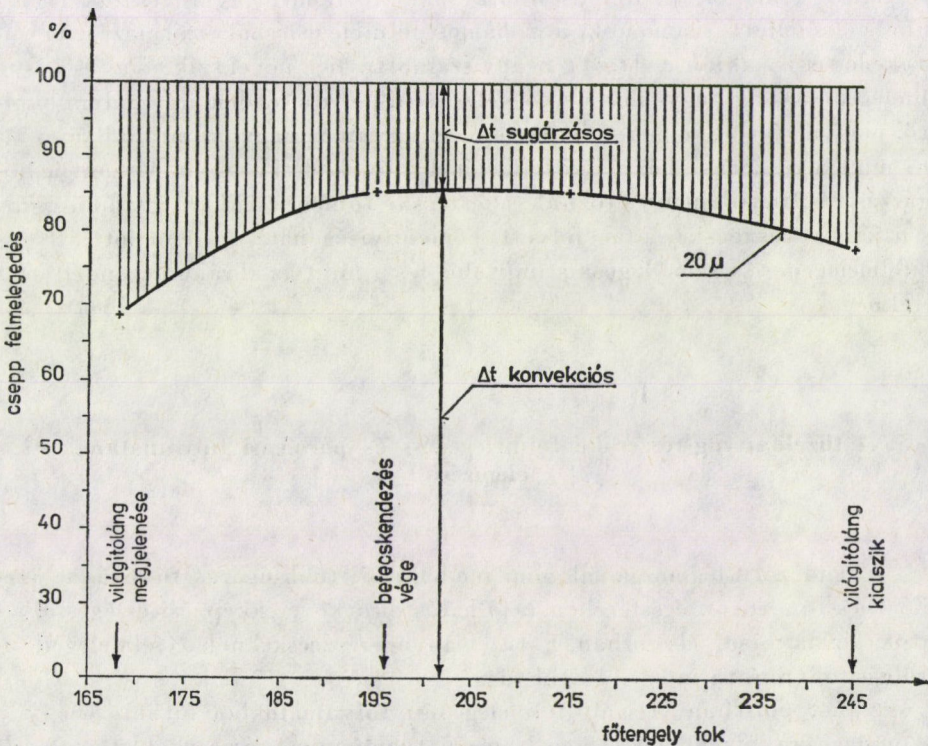
míg az α_k értékére a következő adat vehető számításba [1]:

$$\alpha_{20} = 28,2 \cdot 10^3 \text{ kJ/m}^2 \text{ Kh.}$$

A közelítő számítás eredményeit a 7. ábrán rajzoltuk fel. Ebből az ábrából kiolvasható még, hogy a világító lánggal történő égés utolsó pillanataiban $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ alatt a részecske sugárzásos úton történő átlagos részfelmelegedése 21,7%-át képezi a részecske teljes átlagos felmelegedésének.

A számítások részeredményeit célszerű összevonni és egy ábrán szemléltetni.

Az 5., 6. és 7. ábrák alapján felépíthető a 8-as ábra. Ezen az ábrán egy 20μ átmérőjű tüzelőanyag-részecske konvekciós és sugárzásos úton történő átlagos felmelegedésének közelítő %-os megoszlása látható, a világító láng megjelenésének pillanatától a láng kialvásának pillanatáig terjedő időszak alatt. A 2.5.2. pontban jelzett motorhoz tartozó, a láng kialvásának főtenge



8. ábra. Egy 20μ átmérőjű tüzelőanyag-részecske konvekciós és sugárzásos úton történő átlagos részfelmelegedésének %-os megoszlása a keverékképzés és égés II., III. és IV. fázisában. A felmelegedés ideje: $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$

fokban jellemzett értéke becslésen alapul [8]. A 8. ábrából kiolvasható, hogy a Diesel-motorokban lejátszódó keverékképzési és égési folyamatokban a világitóláng hőszugárzása a teljes égés fázisában lényeges szerepet tölt be. A hőszugárzás jelentősége különösen számottevő a világitóláng megjelenésének pillanatától a maximális hőmérséklet eléréséig terjedő fázisban és az égés befejező fázisában, amikor az égési légviszony a minimális értékhez tart.

Megjegyzés:

A világitóláng gyújtó- és hőszugárzó hatása kedvezően érvényesül a gázturbinák égőtérceiben és kazánok tüzelőtérceiben kialakuló keverékképzési és égési folyamatoknál is. A gyújtó és hőszugárzó hatás a tüzelőanyag-részecskét az égőtérbe történő belépésétől az elézésig terjedő idő alatt folyamatosan éri.

A közelítő számításakor több elhanyagolást tettünk. Ezek közül az egyik elhanyagolás az, hogy a részecske átlaghőmérsékletének növekedése ellenére a részecske tömegét és az átmérőjét is állandó értékűnek vettük. Ha a részecske tömegét a párolgás miatt csökkenő tendenciával vesszük figyelembe és emellett számolunk a rohamos felmelegedésből származó átmérő-növekedéssel is, akkor a $\Delta t_s / \Delta t_\delta$ arány számottevően növekszik, és a részecske felmelegedése még nagyobb sebességgel történik. Ez a tendencia azzal indokolható, hogy a részecske méretnövekedésével ugyan α_k nagyobb arányban csökken, mint a részecske hőátvevő felületének növekedési aránya, viszont a hőszugárzási viszonyok nem változnak, a részecske tömege csökken, így a hőszugárzás útján a részecske által felvett hőmennyiség hatására előállott átlagos részfelmelegedés viszonylagosan nagyobb lesz, mint az ábrákon szemléltetett esetekben.

5. A tüzelőanyag-részecske felmelegedési és párolgási folyamatának elemzése

A rendezett légmozgással nem rendelkező, többsugaras fúvókával üzemelő Diesel-motorok égésterében a jó hatásfokú keverékképzési és égésfolyamatok kialakulása, elsősorban a tüzelőanyag-részecskéknek a felmelegedési-párolgási folyamata intenzitásától függ.

A 3.4. pontban vizsgált felmelegedési folyamatokból látható, hogy a viszonylagosan kisebb méretű és tömegű tüzelőanyag-részecskék átlagos felmelegedése igen nagy sebességgel történik, különösen a világitóláng megjelenésének pillanatától.

A megelőzőekben már szoltunk a tüzelőanyag-részecskék nagy sebességű elpárolgásáról, az ún. gőzrobbanásról. A következőkben ejtsünk néhány szót a gőzrobbanást kiváltó okokról.

Tekintve, hogy a hőátadás törvényei a tüzelőanyag-részecskén belül is érvényesek, ezért a csepp számított átlaghőmérséklete csak feltételezett érték. A valóságban hőmérséklet-különbség alakul ki a részecske külső és belső rétegei között. A külső réteg hőmérséklete lényegesen nagyobb sebességgel növekszik, mint az átlaghőmérséklet.

A keverékképzés és égés III. és IV. fázisában, amikor a részecske felmelegedése változatlanul nagy sebességgel történik, az elpárolgási sebességet tovább növeli az égéster nyomásának rohamos csökkenése, mivel az egyes párlatok desztillációs hőmérséklete a nyomással együtt rohamosan csökken.

Figyelembe véve az 5. táblázat adatait, látható, hogy a gázolaj könnyebb frakciói a cseppen belül forrásba jöhetnek, ha a csepp hőmérséklete eléri az 500—550 °C értéket. Ennek a számítások szerint meg van a reális valószínűsége. Ezért feltételezhető, hogy lassújárású motorokban a cseppekben bekövetkezik a forrási állapot, túlhevülés esetében pedig a csepp robbanása. Ilyen robbanást vízcseppeken már korábban megfigyeltek.

6. A többsugaras fúvókával üzemelő Diesel-motorokban végbemenő keverékképzési és égési folyamatok egyszerűsített elmélete

A Diesel-motorokban lejátszódó keverékképzési és égési folyamatokra kidolgozott elméletek meglehetősen bonyolultak. E bonyolultság többek között onnan ered, hogy:

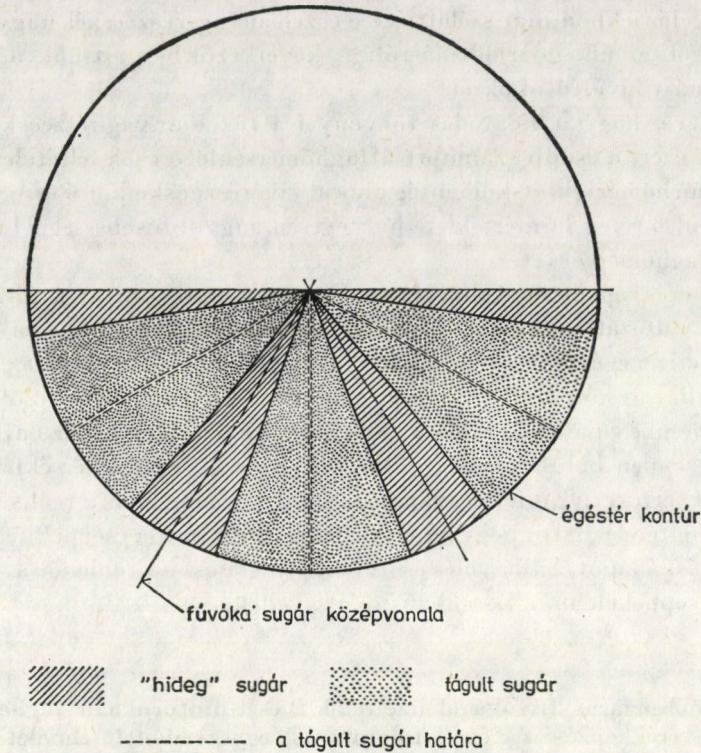
- ma még nem ismeretesek pontosan a folyékony, többalkotós tüzelőanyagoknak a nagy nyomású és nagy hőmérsékletű térben történő viselkedése, a keverékképzés és égés különböző fázisaiban, folyamatosan csökkenő légviszony esetében, különös tekintettel az igen nagy sebességű hőfelvételre,

- nem ismerjük a befecskendezés során a kis méretű tüzelőanyag-részecskében kialakuló áramlási és hőcsere folyamatokat,

- nem ismeretesek a párolgási-, gyulladási- és az égési folyamatok sorozatának kapcsolódása, egymásrahatása, különös tekintettel arra, hogy az egymást követő, az égésterbe jutó tüzelőanyag-részecskék közül nincs két olyan részecske, amely azonos körülmények között párologna, gyulladna és égne el,

- ma még nincsenek ismereteink arra vonatkozóan, hogy miképpen alakulnak a konvekciós hőátadási viszonyok a tüzelőanyagcsepp felülete mentén akkor, mikor az már lánggal ég.

Jelentkeznek ellentmondó tendenciák. Például: a szerző kísérleti eredményei; nevezetesen a makrokeverék egyenletesebbé tételére és a mikrokeverék finomítására tett erőfeszítések erős füst és kokszképződést eredményeztek,



9. ábra. A befecskendező-fúvóka sugarak tágulása, füstmentes, jó hatásfokú égés esetében

amikor a makrokeverék jóságai száma 6-ról fokozatosan 3-ra csökkent. A motor összhatósfoka erősen romlott.

A 2.5.1. pontban leírt befecskendezési sugár terjeszkedés egyértelműen bizonyított tény (3. és 9. ábra). Az optimálisnál nagyobb darabszámú furattal rendelkező fúvóka esetében a keverékképzés és égés során az a helyzet állt elő, hogy a sugarak tágulása következtében két szomszédos sugár olyan közel került egymáshoz, hogy az égés során kialakuló lángfrontok egymásra zavarólag hatottak. Ez a jelenség a keveréknek helyi dúsulását okozta és az égés abban a környezetben nem volt tökéletes, a motor füstölt. Ez a jelenség ellentmond a klasszikus égésszemléletnek, amely szerint törekedni kell az egyenletes makrokeverék és a minél finomabb mikrokeverék előállítására.

(A többsugaras keverékképzés- és égésszemléletben meglévő bonyolultságok egy részének feloldására a szerző a következőkben megfogalmazott, egyszerűsített keverékképzési és égési elméletet, az ún. „dinamikus égésszemléletet” ajánlja.)

A befecskendezés során az égéstérbe különböző méretű tüzelőanyag-részecskék jutnak. A különböző méretű részecskék közül vannak olyanok,

amelyeknek *optimálisak a párolgási, a gyulladási és égési körülményeik*. Egy részüknek nem annyira kedvező és vannak olyan részecskék, amelyek kedvezőtlen tulajdonságúak. A kedvezőtlen tulajdonságú részecskék az osztódás során kedvezőbb tulajdonságúakká válnak.

Az optimális tulajdonságú részecskékre jellemző, hogy a párolgási, keverékképzési, a gyulladási és égési tulajdonságaik — adott motort, égésteret, befecskendező rendszert figyelembe véve — optimálisak és a részecskék füstmentesen, jó hatásfokkal égnék el. Minden bizonnyal állítható, hogy az optimális tulajdonságú részecskék mérete más az I. gyulladási késedelem —, más a II. az égésnek a világitóláng megjelenésének pillanatától a körfolyamat maximális nyomásáig terjedő —, más a III. a körfolyamat maximális hőmérsékletéig terjedő —, és más a IV. az égés befejező szakaszában.

A jó hatásfokú, füstmentes égés csakis úgy mehet végbe, hogy a befecskendező fúvóka zömmel optimális méretű tüzelőanyag-részecskéket állít elő, és a keverékképzés és égés során a nagyobb méretű részecskék is optimális, illetve ahhoz közelálló méretűvé formálódnak, osztódnak.

Tekintsük át az egyszerűsített elmélet részleteit a keverékképzés és égés egyes fázisaiban.

I. fázis. A gyulladási késedelem

E fázisra jellemző a tüzelőanyag-részecskék viszonylag lassú felmelegedése és elpárolgásuk kezdő folyamata, amikor is a könnyebb párlatok egy része gőz állapotba kerül és fokozatosan kialakulnak a gyulladásra képes centrumok. Ezek a centrumok a sugárkúp palást külső részében, de ahhoz közeli térfogatokban helyezkednek el ott, ahol a légviszony a legkedvezőbb az öngyulladás számára.

A gyúlási késedelem fázisában a részecske átlagos felmelegedése, illetve a külső rétegének felmelegedése lényegesen kisebb sebességgel történik — a töltet kisebb hőmérséklete miatt —, mint a folyamat későbbi fázisaiban.

A gyúlási késedelem fázisában a részecskékből elpárolgott könnyebb tüzelőanyag-párának egy része leszakad a még nagysebességgel haladó részecskéről és lefékeződik, illetőleg diffúzió révén eloszlik a környezetben. Egy másik része a részecske körül kialakult gőzburkot alkotja. A képződött tüzelőanyag-párakat segítenek elkeverni a szívás üteme során keletkezett, de még meglevő légmozgások.

A tüzelőanyag-részecskék csökkenő mérettel az ún. „hideg” pályán haladnak, a párák pedig zömmel a befecskendezési sugár térfogatában és annak környezetében helyezkednek el és fokozatosan érik el a gyulladási hőmérsékletet.

E fázisban célszerű a lehető legkisebb méretű, kis behatoló képességű részecskék előállítását, a viszonylag kicsiny hőmérséklet-különbség mellett is

a gyors elpárolgás megvalósítására. A nagy behatoló képességű részecskéknak a még csepp alakban levő része eljuthat a hengerpersely falra és ott lecsapódva veszteséget okoz.

II. fázis. Az égés kezdete és a körfolyamat maximális nyomása közötti szakasz

E fázisra jellemző: a képződött tüzelőanyagpárák öngyulladása és az égés kifejlődése, folyamatossága.

Ha a tüzelőanyag-párák elérték az öngyulladási hőmérsékletet, akkor minden bizonnyal a befecskendezési sugárkúp palástjának környezetében meggyulladnak és az égésük detonációszerűen történik. A gyulladás pillanattáig kialakult keverékben főleg a legkisebb desztillációs hőmérséklettel bíró tüzelőanyag-párlatok helyezkednek el és ezeknél következik be az öngyulladás. A detonáció jellegű égés oka a térfogati öngyulladás. Hogy a detonáció mégsem fejlődik tovább, annak az oka — szemben az Ottó motoron helytelen viszonyok folytán bekövetkező detonációval —, hogy a gyúlási késedelem alatt bejuttatott tüzelőanyag-mennyiség csak közel egytizedrésze a teljes tüzelőanyag-mennyiségnek és a bejuttatott mennyiségnek is csak egy része kerül gőz állapotba. A gyulladás után az égés a világító láng megjelenésével folyamatossá válik.

A világító láng megjelenésével a láng gyújtó- és hőszugárzó hatása révén új elem lép be a keverékképzés és égés folyamatába.

A keverékképzésnek és égésnek ebben a szakaszában a töltet nyomása eléri a legnagyobb értékét, a hőmérséklet pedig közeledik a legnagyobb értékéhez. Az újonnan keletkező cseppek felmelegedése és párolgása gyorsan következik be. Az átlagos légviszony folyamatosan csökken.

Ebben a fázisban már kedvező a nagyobb behatoló-képességű tüzelőanyag-részecskék előállítása elsősorban azért, hogy a tüzelőanyag eljusson a hengerperselyfal közelében levő levegőrétegekbe is.

A rendezett légmozgással nem rendelkező Diesel-motorokon a befecskendezés során a tüzelőanyagot a kompresszió-térfogat egy kisebb részébe juttatjuk be, és az égés időbeni lefolyása biztosításához szükséges egy automatikus folyamat, ami a jó minőségű keverékképzést nagysebességgel folyamatosan fenntartja, illetőleg kiterjeszti az égést az égéstérnek keverékkel kitöltött térfogatára.

Az automatikus keverékképző folyamatot a tüzelőanyag-részecskék nagy sebességű felmelegedése által hozza létre, hogy egyrészt a sugár kitágul, másrészt a cseppek egy részének párolgása robbanásszerűen „gőzrobbanás”-sal megy végbe. Ez azt eredményezi, hogy égő tüzelőanyag-pára és égő tüzelőanyag-részecske is kijut a geometriai befecskendezési sugárkúp palástján kívüli térfogatokba.

Természetesen a tüzelőanyag-párak diffúziója a környező térfogatokba változatlanul tart, jóllehet ezek gyulladása a diffúziót bizonyos mértékig akadályozza.

Az égéstérbe érkező újabb és újabb tüzelőanyag-részecskéket ebben a fázisban már valóságos „lángtenger” fogadja, és röviddel a belépésük után már a felszínük lángbaborul. Ez a jelenség tovább javítja a keverékképzés és égés minőségét. A felszíni égés a konvekciós és sugárzó hőhatással együtt ugyanis segíti a részecske osztódását és a „gőzrobbanást”.

Az átlagos égési légviszony csökkenése és a folyamatos gyulladás-égés azt eredményezi, hogy mérséklődik az égés sebessége. Detonációs jellegű égés azért nem tud létrejönni, mert az elkevert tüzelőanyag-párak térfogata korlátozott.

III. fázis. A maximális nyomás helyétől a maximális hőmérséklet végéig terjedő szakasz

E fázisra jellemző, hogy a töltet nyomása rohamosan csökken, a töltet hőmérséklete eléri maximumát és a fázis végéig közel állandó értékű marad. Befejeződik a tüzelőanyag befecskendezése.

Ebben a fázisban alakulnak ki a legkedvezőbb feltételei a keverékképzésnek és égésnek. A robbanásszerű elpárolgás itt a korábbiaknál nagyobb sebességgel történik, amelyet elősegít a töltet nyomásának rohamos csökkenése következtében előálló tüzelőanyag desztillációs hőmérsékletcsökkenés.

A bejuttatott tüzelőanyag egyre nagyobb mennyisége ég el, ezzel az oxigénkoncentráció folyamatosan csökken és ezáltal a keverékképzés feltételei a fázis utolsó részében nehezebbé válnak, de a robbanásszerű elpárolgás segíti a keverékképzés jó hatásfokkal történő lefolyását.

Az I., a II. és a III. fázisban esetleg keletkezett szén-, koks- és korom-részecskék jól hangolt befecskendező fúvóka esetében még ebben a fázisban tökéletesen elégnak.

IV. fázis. A maximális hőmérséklettől a láng kialvásáig terjedő szakasz

E fázisra jellemző:

- a nyomás és a hőmérséklet csökkenése,
- a befecskendezett tüzelőanyag elégése befejeződik, a láng kialszik,
- a légviszony értéke eléri a minimumot.

Az égésnek ebben a szakaszában a hőmérséklet csak mérsékelten csökken, a nyomás rohamos csökkenésének hatására a még csepp alakban levő tüzelőanyag-részecskéknek robbanásszerű elpárolgása tovább folytatódik, és ez a jelenség automatikusan gondoskodik arról, hogy a zömmel optimális tulajdonságú tüzelőanyag-részecskékkel a keverékképzés és égés jól hangolt befecskendező fúvóka esetében koromképződés nélkül, jó hatásfokkal fejeződjék be.

A fentiekben megfogalmazott égésmechanizmust a szerző kísérleti eredményei támasztják alá. Így pl. a különböző lyukszámú ($6 \times 0,35$, $7 \times 0,35$, $8 \times 0,35$) porlasztókkal végzett kísérletek szerint a keverékképzés és a hatásfok romlott, ha a sugarak egymásba értek, s ezzel a szabad keverékképzési felületük csökkent. A jól megválasztott porlasztóknál a lyukátmérő a szükséges behatolási mélységet és cseppméretet biztosítja, míg a sugarak számának a teljes szabad keverékképzési felületet kell biztosítania.

Hosszabb úton a sugár kitágulása nagyobb, kúpszöge növekszik. Ezért a nagyobb átmérőjű égéstérben kisebb lyukszámú ($6 \times 0,35$, illetve $6 \times 0,5$) míg a kisebb átmérőjű hengerben a nagyobb lyukszámú ($8 \times 0,35$) porlasztó adta az optimumot.

IRODALOM

1. SITKEI GY.: Keverékképzés és égés lefolyása Diesel-motorokban. Akadémiai Kiadó, Budapest 1960
2. LÖHNER, K.: Brennkraftmaschine. VDI 1963
3. BRODSZKY D.: Feltöltött Diesel-motorok. Műszaki Könyvkiadó, Budapest 1970
4. MEURER, S.: Der Wendel in der Vorstellung vom Ablauf der Gemischbildung und Verbrennung in Diesel-motor. *MTZ.*, Heft 4, 1966.
5. KALMÁR I.: Munkafolyamatok elektronikus számításával nyert néhány eredmény. *Budapesti Műszaki Egyetem tudományos ülésszaka*, I. kötet, 1967.
6. SITKEI GY.: Hőátadás és hőterhelés belsőégésű motorokban. Akadémiai Kiadó, Budapest 1962
7. KALMÁR I.: Munkafolyamatok szimulációjának kérdései. *Műszaki Tudomány* 47 (1973)
8. AEPLER, E.—BATURIN, CN.: Optische Methode zur Untersuchung der Russkonzentration in Brennraum von Dieselmotoren
9. SITKEI GY.: Flammenstrahlung in Diesel-motoren. *Archiwum Procesow Spalania* 5 (1974), Nr. 2
10. MAXWELL, J. B.: DATA Book on Hydrocarbons, D. Van Nostrand Co. Princeton, N. J. 1950
11. PISCHINGER, A.: Alte und neuere Vorstellungen über die Gemischbildung im Diesel-motor. *Österreichische Ingenieur Zeitschrift* 10, Heft 7
12. LOSONCI P.: Hajó Diesel-motoron végrehajtott áramlástechnikai és égéstechnikai változtatásoknak az effektív hatásfokra gyakorolt hatásai. *Periodica Polytechnica* (1980)

Contribution to the Ignition and Combustion Processes of the Direct Injection Supercharged Diesel Driving Engines. — The current theories relating to the formation of mixture, processes of ignition and combustion taking place in the combustion chamber of the diesel driving engines, working with integral combustion chamber and multiple-hole nozzle, are rather intricate. This paper tries to partially resolve these complexities accentuating the heat radiation effect of the lighting flame playing a significant part in the high-speed warming process of the fuel particles, the high-speed evaporation process to be deemed as significant in the process of the formation of the mixture, the so-called steam explosion which makes the processes of formation of the mixture and the combustion to be self maintained.

Beitrag zu den Zündungs- und Verbrennungsprozessen der kompressionslosen Diesel-Schiffsantriebsmotoren. — Auf die in der ungeteilten Verbrennungskammer der mit Mehrlochdüsen arbeitenden Diesel-Schiffsantriebsmotoren verlaufenden Gemischbildungs-, Zündungs- und Verbrennungsprozesse bezügliche derzeitige Theorien sind ziemlich verwickelt. Diese Abhandlung versucht diese Verwickelungen partiell aufzulösen und betont den Wärmestrahlungseffekt des im raschen Erwärmungsprozess der Brennstoffteilchen eine wichtige Rolle spielenden Wärmestrahlungsprozesses der Leuchtflamme den im Gemischbildungsprozess, als bedeutend erachtbare raschen Verdampfungsprozess, die sog. Dampfexplosion, die die Gemischbildungs- und Verbrennungsprozesse selbstwirkend macht.