

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Doktori Tézisfüzetek
Gépészmérnöki Kar Doktori Tanácsa

írta:

Bereczky Ákos
okleveles gépészmérnök

OTTÓ-MOTOROK NO KIBOCSÁTÁSÁNAK
MODELLEZÉSE

című témakörből,
amellyel a PhD fokozat elnyerésére pályázik

Témavezető: Dr. Meggyes Attila, egyetemi tanár

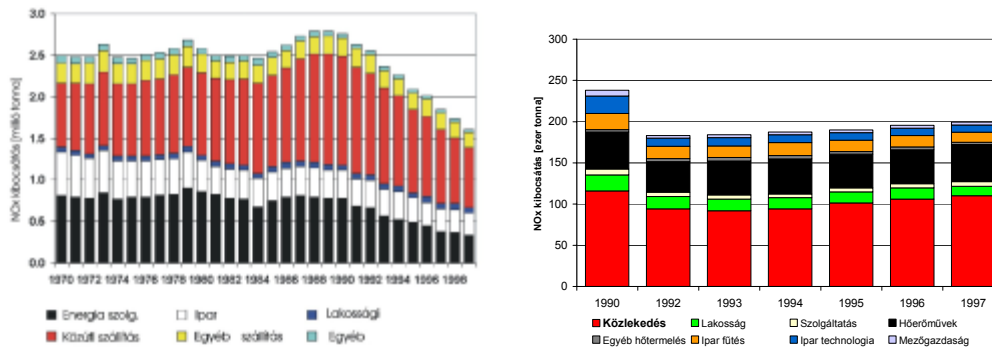
Budapest

2002

1. A kutatás előzményei, kitűzött célok és a vonatkozó irodalmak elemzése

A XX. században közel egy nagyságrenddel nőtt a folyékony, és gáz halmazállapotú fosszilis energiahordozók felhasználása. Hatására a társadalom számára eleinte életvitel minőségi, később eszmei igény lett a károsanyag és szennyező anyag kibocsátás csökkentése. Ezért a gépjárművek – belsőégésű motorok – által kibocsátott károsanyag csökkentése igen fontos környezetvédelmi és gazdasági kérdés. A kutatók és fejlesztők hatalmas erőfeszítéseket fordítanak Ottó-motoroknál a CO, T.HC. mellett a NO_x emisszió csökkentésére.

Az elmúlt évtizedekben jelentős eredményeket sikerült elérni az Ottó-motorok NO_x kibocsátásának csökkentése érdekében. Ez elsősorban a kipufogórendszerbe épített ún. háromutas katalizátoroknak köszönhető. Azonban statisztikai adatok alapján látható, hogy továbbra is közlekedés, azon belül is a legnagyobb számban képviselt Ottó-motorok a legjelentősebb kibocsátók (1. ábra).



1. ábra. A NO_x kibocsátás a különböző ágazatok között Angliában [21] és Magyarországon [29,30]

Ha megvizsgáljuk Anglia, egy fejlett ipari ország ágazatonkénti NO_x kibocsátását látható, hogy korszerűbb gépjármű park ellenére, noha a közlekedés kibocsátása a 90-es évek kezdete óta közel a felére csökkent, annak értéke továbbra is jelentős. Míg Magyarországon a korszerűsödő de növekvő számú gépjármű park hatására nő az NO_x kibocsátás.

A NO kibocsátás csökkentése céljából további lehetőség az égési folyamatok optimalizálása. Ehhez szükséges a NO keletkezést modellezése.

Az Ottó-motorokra NO_x kibocsátására vonatkozó szakirodalmat három szempont szerint célszerű kategorizálni. Első kategória az alkalmazott NO modell. Itt a két alapszempont létezik: egy egyszerűsített Zeldovics mechanizmus [58] vagy a Miller-Bowman mechanizmus [40]. A következő kategória a mechanizmusok számára alapvető bemeneti adatsor, a hőmérséklet időbeli lefolyását meghatározó számítási modell típusa. Itt szintén két típus létezik: a kétzónás [17,20,46,47] illetve multizónás modell [19,36,39]. A harmadik kategória a modell ellenőrzésére alkalmazott mérési eljárás, amely több esetben nem szorítkozik az általunk is használt kipufogó csőben történő mérésre, hanem az égési folyamat (munkafolyamat) során valamely paraméter mérését is lehetővé teszi: pl. hőmérséklet, NO koncentráció [1,25,33,42].

Amint az a fentiekben kitűnik, a vonatkozó irodalmak elsősorban a modellezés módszereivel foglalkoznak, mivel céljuk a mért indikált nyomás alapján a NO kibocsátás számítása. Egyik

sem foglalkozik részletesen az egyes befolyásoló paraméterek hatásának vizsgálatával, mindössze a füstgáz visszavezetés és a légfelesleg változtatását kísérik figyelemmel.

2. Alkalmazott módszer és elért eredmények:

A modell felépítéséhez áttekintettem a különböző termodinamikai modelleket. Ezek az egyzónás, kétzónás illetve a multizónás modell.

Az egyzónás modell abból a feltevésből indul ki, hogy az égéstérben lévő közeg hőmérséklete azonos a térfogat minden pontján egy adott időpontban (illetve az ahhoz tartozó főtengely helyzetben). Mérési eredményekből ismerjük az égéstérben a nyomást a szög függvényében, számítások alapján az ehhez tartozó térfogatot; feltételezzük, hogy az égéstérben homogén tüzelőanyag–levegő keverék alakul ki. Ennek segítségével meghatározható a hőátadás, az elégt tüzelőanyag-hányad, valamint az átlagos hőmérséklet.

A kétzónás modell az égéstérben lévő közeget két egymástól hőátadás szempontjából elszigetelt térfogatra bontja. Az egyik térfogatrészben a már elégett keverék van, míg a másikban a tüzelőanyag–levegő keverék. Külön számoljuk a két hőmérsékletet. Mindkét térfogat külön ad le, illetve vesz fel hőt a faltól a rá jellemző eltérő mértékben, viszont a két térfogatrész nyomása megegyezik. Ennek segítségével szintén meghatározható a hőátadás, az elégt tüzelőanyag-hányad, valamint a két térfogatrész átlagos hőmérséklete.

A multizónás modell a NO keletkezési számításához szükséges bemenő paraméterek meghatározására szolgáló ún. indirekt módszer. Ennek a lényege, hogy nem magát az indikátor diagrammot tekintjük bemenő adatnak, hanem az égésfüggvényt. Az égésfüggvény meghatározható az egyzónás illetve a kétzónás modell segítségével. Ezek eredményei a Vibe-féle égésfüggvény képlet segítségével kerülnek felhasználásra, melynek használata igen megkönnyíti az égési folyamat paraméteres vizsgálatát:

$$x_b = 1 - e^{-6.809 \left(\frac{\varphi - \varphi_{\text{égéskez.}}}{\varphi_{\text{égésvég}} - \varphi_{\text{égéskez.}}} \right)^{m_e}} \quad (1)$$

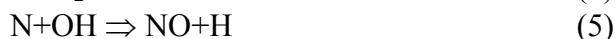
A multizónás modell alkalmazása során ismertnek feltételezzük az égéstér geometriáját, az abba beszívott levegő hőmérsékletét, a szívóselep zárása pillanatában a levegő nyomását és az elégett tüzelőanyag-hányad időbeli lefutását (égéstörvény), illetve annak deriváltját. Az égésteret az egyszerűség kedvéért annyi részre osztjuk fel, amennyi az égés hossza fokokban,

A vizsgálatok alapján megállapítom, hogy a NO kibocsátás számításához a multizónás modell a legcélszerűbb. Az egyzónás modell viszont a modell ellenőrzésére, a mérések során felvett indikátor diagrammok kiértékelésénél jól alkalmazható.

Vizsgálom a termikus Zeldovics, illetve a termikussal kibővített prompt Miller–Bowman NO keletkezési mechanizmust.

A termikus NO keletkezés mechanizmusát először Zeldovics írta le [58]. Elmélete szerint magas hőmérsékleten a levegő O₂ molekulái aktív atomos O-re bomlanak, és ez lép reakcióba a levegő N₂ molekuláival, mely során NO és N keletkezik (3). Ez további reakciót indít be: az

atomos N reakcióba lép az O₂ molekulával ennek során NO és további atomos O keletkezik (4), valamint OH gyökök jelenlétében az atomos N oxidál, NO és atomos H keletkezik (5).



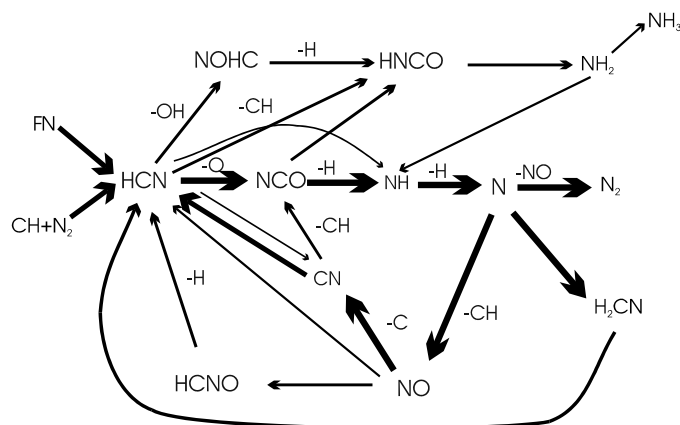
A viszonylag lassú termikus NO keletkezés mellett először Fenimore [13] mutatott rá az NO keletkezés gyors, elsősorban a tüzelőanyagban gazdag égések esetén a lángban és annak közelében lezajló folyamatára. Az égés során az oxidációs folyamatok közben szénhidrogén gyökök keletkeznek, amelyek reakcióba lépnek a levegő N₂ tartalmával, majd ezek az instabil közbenső termékek tovább reagálnak. A reakciókért különböző széntartalmú gyökök felelősek, mint pl. CH, CH₂, C₂, C₂H és a C. A legfontosabb reakciók a következők:



Az instabil közbenső HCN molekulák tovább reagálnak:



A valóságban sokkal összetettebben zajlanak le a reakciók a közbenső termékekkel. Ennek leírását adja Miller és Bowman [40], melynek reakciói a 2. ábrán láthatók.



2. ábra. A prompt NO keletkezés útvonalai /a nyilak vastagsága szemlélteti a reakció gyakoriságát [40].

A termikussal keletkezés modellel kibővített nagyszámú reakcióegyenlet megoldásához a CHEMKIN-II programcsomagot alkalmaztam [34].

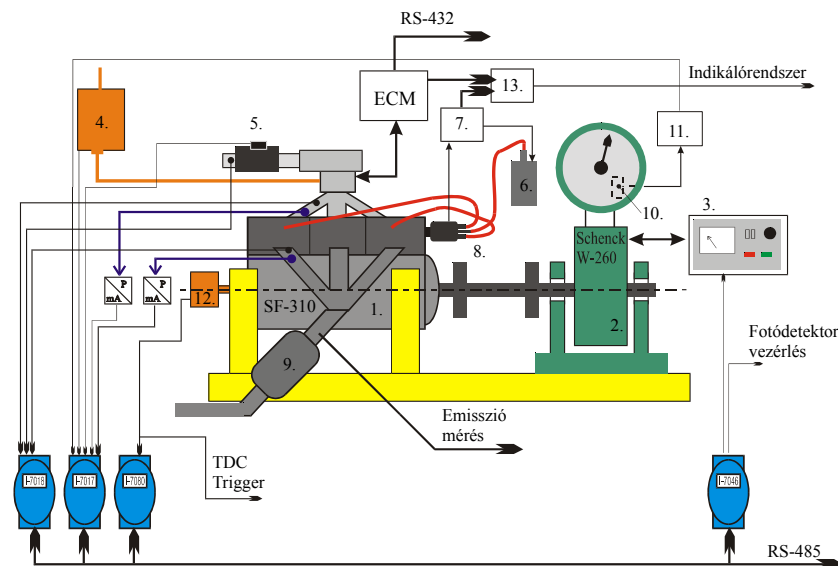
Számítások alapján megállapítom, hogy Ottó-motorok NO kibocsátásának számításánál a Zeldovics mechanizmus használata szolgáltatja a megfelelő pontosságú eredményt.

A felépített modell segítségével –az előzetes mérések alapján tetszőlegesen kiválasztott – hat jellemző égési folyamat külső paramétereit változtattam. Mind a hat égési folyamata esetében

minden égéskezdethez egy adott égéshossz tartozik, az égés lefolyása (alaktényező) pedig megegyezik. Ennek segítségével megállapítottam, hogy az előgyújtás igen jelentős hatással van a NO kibocsátásra viszont mind a kezdeti nyomás, mind a kezdeti hőmérséklet igen jelentős a változás mértékére. A kompresszió kezdeti nyomásának csökkentése esetén a NO kibocsátás nő a disszociáció növekedése miatt. Az égéshossz csökkenés hatására nő a NO kibocsátás, viszont az előgyújtás csökkenésével az égéshossz hatása kisebb. A Vibe-féle alaktényező növelésének hatására a kibocsátás nagy előgyújtás esetén jelentősen csökken, az előgyújtást csökkentve hatása kisebb. A fordulatszám növelése esetén a kibocsátás csökken, előgyújtás csökkentésével hatása növekszik.

A felépített modell helyes működését mérésekkel bizonyítom. Mérem egy adott motor NOx kibocsátását és az indikátor diagrammok és optikai rendszer segítségével meghatároztam az égési folyamat paramétereit (égéshossz, gyulladási késedelem, alaktényező).

Méréseim során egy Schenck W-260 típusú örvényáramú féket használtam, ennek legfőbb előnye az elektromos szabályzás. Lehetőségem volt a n=áll. üzemmódban a számítógépes rendszer segítségével beállítható állandó fordulatszám mellett mérni. A fékpad rendszer kiépítése során törekedtem –a mérések megkönnyítése érdekében– minden mérést számítógépre vinni.



3. ábra. A fékpad rendszer felépítése

1. SUZUKI SF-310 motor; 2. Schenck W-260 típusú fék; 3. fék szabályzó elektronika; 4. gravimetrikus fogyasztás mérő; 5. hődrótos térfogatáram mérő; 6. gyújtó transzformátor; 7. jelformáló és gyújtáskésleltető; 8. gyújtás elosztó; 9. katalizátor; 10. erőmérő cella; 11. erőmérő cella leválasztó erősítő; 12. szögjeladó (encoder); 13. optikai leválasztó egység.

Az indikáló rendszer alapvető alkotóelemei a motoron elhelyezkedő különböző jeladók, mint a gyorsan változó jelek mérésére szolgáló jeladók (pl. Piezo-kristály, Piezo-rezisztív jeladó, ...), mint a lassan változó jelek mérésére szolgáló jeladók (pl. referencia nyomás jeladó, termoelemek), valamint a főtengely elmozdulását mérő szögjeladó és az ehhez kapcsolódó felsőhőtpont jeladó.

A felsőhőtpont beállítására a Jánosi [23] által kidolgozott, majd a célra továbbfejlesztett égésnélküli nyomás maximum módszerét alkalmaztam.

Az égés optikai vizsgálatára egy speciálisan átalakított gyújtógyertyát használunk. Ennek házában 8 hosszanti furat van kialakítva, végükön egy zafír kristály van rögzítve, amely átengedi a szükséges sáv szélességben a fényt és kevésbé érzékeny a hőre. A kristályok után kvarc száloptika található, ez viszi a fényt a fotósokszorozóhoz. A fotósokszorozó a célnak leginkább megfelelő érzékelő, az általunk alkalmazott rendszer 170 nm-től 720 nm-ig érzékeny, amely tartomány mind az UV, mind a látható fény tartományát lefedi.

A mért és számított NO értékek összehasonlításával megállapítom, hogy a modell 10%-nál kisebb eltéréssel használható, homogén keverék esetén.

3. Új tudományos eredmények, tézisek:

Disszertációmban különböző területeket érintek, ahol új tudományos eredményeket értem el. Felépítettem és mérésekkel ellenőriztem egy modellt, amellyel az 1. tézis foglalkozik. A modellel kapcsolatosan általánosan vizsgáltam a NO keletkezési sebességét befolyásoló tényezőket, eredménye a 2. tézis. Disszertációm nagy súlyt fektet az Ottó-motorok NO kibocsátás egyes paramétereinek hatására, így ezzel kapcsolatos a legtöbb tézis (3-8). A felépített modell ellenőrzésére kidolgozott mérő rendszerrel foglalkozik a 9. tézis. Az elért tudományos eredmények tézisekben a következők:

1. Felépítettem egy többzónás, számítási modellt, amely adott motormechanizmus esetén, sztöchiometrikus légfelesleg tényező és tetszőleges tüzelőanyag esetén a Vibe féle égéstörvény segítségével meghatározza az egyes állandó tömegű egységek nyomás és hőmérséklet profilját az idő (szögelfordulás) függvényében. A tömegegységek paramétereinek ismeretében számítás útján határozza meg az Ottó-motorok NO kibocsátását különböző keletkezés mechanizmusok figyelembevételével [4.4.-4.7., SV-7, SV-8, SV-10, SV-14].
2. Az Ottó-motorokra jellemző hőmérséklet és nyomás hatását vizsgáltam a termikus NO keletkezésre. Megállapítottam, hogy 2000 K és 3200 K illetve 1 bar és 70 bar közötti tartományban, sztöchiometrikus légfelesleg mellett, ha a kezdeti NO koncentráció nulla, oktán (C_8H_{18}) tüzelése esetén, a füstgázban a NO keletkezési sebessége a következő függvény szerint változik [3.1]:

$$d[NO]/dt = A \cdot p^B \text{ [mol/(s} \cdot \text{cm}^3\text{)]}$$

ahol:

$$A = 0,0743638 - 323,073/T + 351216/T^2$$

$$B = -6,24551 + 32172,7/T - 5,07937 \cdot 10^{+7}/T^2$$

p [bar], T [K], $2400 \text{ K} < T < 3200 \text{ K}$, és $10 \text{ bar} < p < 70 \text{ bar}$

Az Ottó-motorok égésfolyását befolyásoló paraméterek vizsgálata során –előzetesen feltételezve, hogy összehasonlíthatóság érdekében az égési folyamat különböző feltételek mellett állandó– sztöchiometrikus légfeleslegre a következőket állapítottam meg:

3. Az előgyújtás hatását vizsgálva megállapítottam, hogy az előgyújtás igen jelentős hatással van a NO kibocsátásra; viszont a modellel nyert eredmények azt mutatták, hogy mind a kezdeti nyomás, mind a kezdeti hőmérséklet igen jelentős hatással bír a változás mértékére, így a NO kibocsátás csak ezen paraméterekkel együtt vizsgálható [5.1-5.4].
4. A kompresszió kezdeti hőmérsékletének növekedése esetén a NO kibocsátás növekvés mértéke függ a kompresszió kezdeti nyomásától.

A kezdeti hőmérsékletet 300 K-ről 400 K-re növelve alacsony (0,3 bar) kompresszió kezdeti nyomás esetén az átlagos növekedés 20 %, 0,6 bar-os kompresszió kezdet esetén 52 %, míg 0,8 bar-os kompresszió kezdet esetén 60 %, azaz, a kezdeti nyomás növekedésével a hőmérséklet hatása erősödik.

A kompresszió kezdeti hőmérsékletét 300 K-ről 400 K-re növelve nagyobb előgyújtás esetén a hőmérséklet növelés hatása csökken. A nyomás és az előgyújtás változás hatása függvény alakban a következőképpen adható meg [5.3.]:

$$\Delta NO [\%] = A + B * \Delta \varphi_{\text{égésk.}} + C * \Delta \varphi_{\text{égésk.}}^2$$

$$\begin{aligned} \text{ahol: } A &= 189,737 * P_{\text{start}} [\text{bar}] - 753,184 \\ B &= -2,50355 * P_{\text{start}} [\text{bar}] + 9,93408 \\ C &= 0,0115008 * P_{\text{start}} [\text{bar}] - 0,0324021 \end{aligned}$$

5. A kompresszió kezdeti nyomásának csökkentése esetén a NO kibocsátás nő a disszociáció növekedése miatt. A NO növekedése hatása függ a hőmérséklettől és az égéskezdetről. 300 K-es kompresszió kezdeti hőmérséklet esetén 0,8 bar-ról a nyomást csökkentve 0,6 bar-ra 180 fokos égéskezdet esetén a növekedés 45 %, míg 130 fokos égéskezdet esetén mindössze 7,8 %. Tovább csökkentve a nyomást 0,3 bar-ra 180 fokos égéskezdet esetén a növekedés 170 %, míg a 130 fokos égéskezdet esetén mindössze 16 %. Magasabb kompresszió kezdeti hőmérséklet (pl. 400 K) esetén a nyomásnövekedés hatása kb. 5-7 %-kal kevesebb [5.3.-5.4.].
6. Az égéshossz csökkenés hatására nő a NO kibocsátás. A kibocsátás növekedése függ az égéskezdetről. Az előgyújtás csökkenésével az égéshossz hatása csökken. 170 fokos égéskezdet esetén a 130 fokos égéshosszt 30 %-kal csökkentve a NO kibocsátás növekedése 0,7 %, míg 40 %-kal csökkentve a növekedés 2 %, Viszont 130 fokos égéskezdet esetén a 130 fokos égéshosszt 30 %-kal csökkentve a NO kibocsátás növekedése 40 %, míg 40 %-kal csökkentve a növekedés már 55 % [5.5.].
7. A Vibe-féle alaktényező változtatásának hatására az egyes tömegegységekben keletkezett NO koncentráció változása kis mértékű. Jelentős változást a NO kibocsátásra az egyes egységek eltérő tömege okozza. 180 fokos égéskezdet esetén a $m_e=2$ alaktényező $m_e=1$ -re csökkentése esetén a NO kibocsátás 1.4 %-kal csökken, míg $m_e=4$ -re növelése esetén a kibocsátás 9 %-kal nő. Viszont 130 fokos égéskezdet esetén a $m_e=2$ alaktényező $m_e=1$ -re csökkentése a NO kibocsátás 13 %-os csökkenését vonja maga után, míg $m_e=4$ -re növelése esetén a kibocsátás 25 %-kal nő [5.6.].

8. A fordulatszám növelésével csökken a NO kibocsátás. Az előgyújtás csökkentésével a fordulatszám hatása növekszik, a kompresszió kezdeti nyomás csökkentése esetén a fordulatszám hatása csökken. 0,6 bar-os kompresszió kezdeti nyomás esetén a fordulatszám 1500 1/perc-ről növelve 4500 1/perc-re 50 fokos előgyújtás esetén a változás $\approx 0\%$, míg 0 fokos előgyújtás esetén $\approx 50\%$ -os a csökkenés. 0,3 bar-os kompresszió kezdeti nyomás és 0 fokos előgyújtás esetén a $\approx 30\%$ -os a csökkenés [5.7.].

9. Megterveztem és kiviteleztem egy számítógép vezérlésű mérőrendszert, melynek segítségével az előgyújtásnak, a kompresszió kezdeti nyomásnak és hőmérsékletének hatása vizsgálható a motorban lezajló égési folyamatra, illetve a NO kibocsátásra. Létrehoztam egy komplex indikáló rendszert, amely a motor égésterében mért nyomás lefutás alapján meghatározza az égés véget, valamint az égést lefolyást legjobban közelítő Vibe-féle alaktényezőt. Az égéskezdet pontosabb meghatározására direkt optikai módszert alkalmaztam. A rendszer segítségével igazolni tudtam a számítási eredmények helyességét [6.-7., SV-1, SV-2, SV-4, SV-9, SV-11, SV-12, SV-15, SV-16].

Irodalomjegyzék:

- [1.] *Bach M., J. Reissing, and U. Spicher:* Temperature Measurement and NO Determination in SI Engines Using Optical Fiber Sensors, Universitat Karlsruhe, 1996, SAE 961922
- [2.] *Bielert, U.:* Numerische Simulation turbulenter Verbrennungsvorgänge unter motorischen Bedingungen mit einem Front Tracking Verfahren. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [3.] *Boschán É. - Meggyes A.:* Az NO_x-emisszió és csökkentése. OMIKK Budapest 1989, ISBN 963 593 0658
- [4.] *Boschán É. - Meggyes A.:* Effect of environmental factors on the formation of NO_x. 25 th International Symposium on Combustion. The University of California, Irvine p.378
- [5.] *Boschán É. - Meggyes A.:* NO_x keletkezése és mérése égési folyamatoknál. Energia és Atomtechnika (XXXVI) 1983. 11-12 544-550 o.
- [6.] *Bowman C. T.:* Kinetics of Pollutant Fromation and Destruction in Combustion. Combustion Sciences and Technologie, Vol. 1, 1970., 1975/1/pp. 33-45
- [7.] *Chang, S. L., and Rhee, K. T.,* Adibatical Flame Temperatures Estimates of lean Fuel-Air Mixtures, Combustion Science and Tech., 1985 Vol. 44, pp 75-78
- [8.] *Chang, S. L., and Rhee, K. T.,* Empirical for Adiabatical Flame Temperatures for some Fuel-Air Combustion Systems, Combustion Science and Tech., 1983 Vol. 35, pp 203-206
- [9.] *Christill, M.:* Untersuchungen zum Einfluss hinderniserzeugter Turbulenz auf die instationäre Flammenausbreitung in Brenngas/Luft-Gemischen (Dissertation). Karlsruhe, 1990.
- [10.] *Correa S. M., and M. D. Smooke:* NO_x in Parametrically Varied Methane Flames, The Combustion Institute, 1990/pp. 289-395
- [11.] *Dezsényi Gy.–Emőd I.–Finichiu L.:* Belsőégésű motorok tervezése és vizsgálata. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1999.
- [12.] *Fenimore:* Fromation of Nitric Oxide from Fuel Nitrogen in Ethylen Flames. Combustion and Flame 1972/pp. 289-296.
- [13.] *Fenimore:* Fromation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbhone Flames. 13-th International Symposium on Combustion 1971/pp. 371-379
- [14.] *Ferguson, C. R.:* Internal Combustion Engines. Purdue University, 1986.
- [15.] *Fülöp Z.:* Belsőégésű motorok. Tankönyvkiadó, Budapest, 1990.

- [16.] *Glarborg, P. Hadvig, S.:* Development and Test of a Kinetic Modell for Natural Gas Combustion, nordic Gas Technology Center, ISBN 87-89309-44-8, 1991.
- [17.] *Gorenflo Ernst Dipl.-Ing.:*Einflub der Luftverhaltnisstreuung auf die zyklischen Schwankungen beim Ottomotor, Ph.D. thesis, Universitat Karlsruhe, Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. U. Spicher, 1997
- [18.] *Grundo, A. D.:* Untersuchung der turbulenter Flammenausbreitung unter ottomotorischen Bedingungen. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [19.] *Heywood, J. B. and K. Komiyama:* Predicting NO_x Emission and Effects of Exhauste Gas Recirculation in Spark-Ignition Engines. SAE Paper, Nr. 730475, 1973
- [20.] *Heywood, J. B.:* Internal Combustion Engine Fundamentals, McGrae-Hill Book Company, 1988
- [21.] http://www.aeat.co.uk/netcen/airqual/naei/annreport/annrep99/chap5_2.html
- [22.] JANAF Thermochemical Tables, National Bureau of Standards Publication NSRDS-NBS37, 1971
- [23.] *Jánosi László Dr.* Traktor Diesel motorok öregedésének egyes kérdései a mezőgazdasági üzemeltetés szemszögéből, kandidátusi értekezés, 1993
- [24.] *Jerzy Chomiak:* Combustion (A Study in Theory, fact and Application), Abacus Press, 1989. ISBN: 0-85626-500-4.
- [25.] *Kech J.M., J M. Bach, J. Reissing, and U. Spicher:* Detemination of the Local Temperature-distribution in the Combustion Chamber of SI Engines, Karlsruhe, 1995.
- [26.] *Kerstein Alan R. and Peter O. Witze:* Flame-Kernel Model for Analysis of Fiber-Optic Instrumented Spark Plug Data, 1990, SAE 900022
- [27.] *Kleinschmidt Walter Dipl.-Ing.:* Untersuchung des Arbeitsprozesses und der NO-, NO₂-, und CO Bildung in Ottomotoren, Ph.D. thesis, Universitat Karlsruhe
- [28.] Knelson: Medizinische grundlagen des Grenzwertes für NO₂-Immissionen in den USA, VDI Berichte, No 247, 1975/pp.58-64
- [29.] *Központi Statisztikai Hivatal:* Magyar Statisztikai Évkönyv 1990-98, KSH 1990-99.
- [30.] *Központi Statisztikai Hivatal:* Statisztikai Évkönyv 1989, KSH 1990.
- [31.] *Kurlate Rolf:* Motoren-meßtechnik, Vogel Fachbuch
- [32.] *Lavoi G. A., J. B. Heywood, J. C. Keck:* Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines. Combustion Sciences and Technologie, Vol. 1, 1970.
- [33.] *Liu X. J., D. Siegla és D. B. Kittelson:* NO_x Histories in Diesel Engine, Automotive Engine Combustion 1984/pp. 45-52

- [34.] *Lutz E., R. J. Kee and J. A. Miller: SENKIN /CHEMKIN II/ Manual SAND87-8248 (1988)*
- [35.] *Malikov K. Yu., Romanyukha N. Yu., Chetverushkin B. N., Malikov Yu. K.: Mathematical Modelling of Heat Transfer and Nitric Oxide Formation in Flame Jet Impingement Furnace. ECSBT-2, 2000/pp. 91-100.*
- [36.] *Meggyes A. and É. Boschán: Equilibrium NO as a Function of Combustion Parameters, 10-th International Symposium on Combustion Procese, Varso 1987.*
- [37.] *Meggyes A.: NO_x-emisszió csökkentési lehetőségei járműmotoroknál. Járművek, Építőipari és Mezőgazdasági Gépek 43. évfolyam 1996. 2. szám 41-50*
- [38.] *Meggyes Attila Dr. – Dr. Boschán Éva: Korszerû tüzeléstechnika III. kötet, OMIKK Budapest, 1988*
- [39.] *Meggyes Attila Dr: Hőerőgépek égéstermékei okozta levegőszennyezés, Műegyetemi Kiadó, 1993*
- [40.] *Miller J. A. and C. T. Bowman: Mechanism and Modelling of Nitrogen Chemistry in Combustion, JOECS, 1990 pp. 287-338.*
- [41.] *Nastoll, W.: Untersuchung zur instationären turbulenten Flammenausbreitung in geschlossenen Behältern (Dissertation). Karlsruhe, 1989.*
- [42.] *Nightingale D. R.: Fundamental Investigation into the Problem of NO Formation in Diesel Engines, ASME-750848*
- [43.] *Olikara, C., and Borman, G. L. . A computer Program for Calculating Properties of Equilibrium Combustion Products with Some Application to I.C. Engines, 1975 SAE Paper 750468.*
- [44.] *Pécsi Tibor Dr.: A jelátvivő nitrogén-monoxid, ÉT 1416/1998*
- [45.] *Pflaum, W.: Wärmeübergang in der Verbrennungskraftmaschine. Springer, Wien, 1977.*
- [46.] *Pischinger, R.–Krassnig, G.–Taučar, G.–Sams, Th.: Thermodynamik der Verbrennungskraftmaschine. Springer, Wien, 1989.*
- [47.] *Rade Jankov Prof. dr: Termodinamicki nultodimenzionalni modeli sagorevanja u otomotoru. Masinski fakultet u Beogradu, 1995.*
- [48.] *Reuter W. Dipl.-Ing.: Vergleichende Untersuchung von Mebverfahren zur Erfassung der flammenausbreitung in Ottomotoren. Ph.D. thesis, Universitat Aachen, Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. F. Pischinger, 1989.*
- [49.] *Sitkei Gy.: Keverékképzés és égés karburátoros motorokban. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1969.*

- [50.] *Stapf D. Dipl.-Ing:* Experimentell basierte Weiterentwicklung von Berechnungsmodellen der NOx-Emission technischer Verbrennungssysteme, Mannheim, Fortschritt-Berichte VDI, 1998
- [51.] *Stone, R.:* Introduction to Internal Combustion Engines. SAE, Warrendale, 1994.
- [52.] *Szemjonov N. N.:* A kémiai kinetika és a reakcióképesség néhány problémája. Akadémiai Kiadó, 1961
- [53.] *Trautwein, S. E.:* Untersuchung des Einflusses der Turbulenz auf die Flammenausbreitung unter motorischen Bedingungen (Dissertation). Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule, Aachen, 1989.
- [54.] *Urlab, A.:* Verbrennungsmotoren, Band 2, Verfahrenstheorie, Springer, Berlin, 1989
- [55.] WHO: Health aspects related to indoor air quality, Kopenhagen, 1979.
- [56.] *Woschni, G.:* Beitrag zum Problem des Wärmeüberganges in Verbrennungsmotor, MTZ Nr. 4, 1965
- [57.] *Woschni, G.:* Die Berechnung der Wandwärmeverluste und der thermischen Belastung der Bauteile von Dieselmotoren, MTZ Nr. 31, Heft 12, 1970
- [58.] *Zeldovics:* Akta Fizikohimija. SzSzSzR 1941/21k./4sz/577-628.

Tudományos közlemények az értekezés témakörében:

- SV-1. *Á. Bereczky- A. Grégász- A. Meggyes Ph.D.:*Development of up-to-date power brake measuring system for measuring and education, Miskolc, MicroCAD '97 /El, Publ /A//
- SV-2. *Á. Bereczky A. Grégász A. Meggyes Ph.D.:*Development of up-to-date power brake measuring system for measuring and education, 3rd International Conference on Heat Engine and Environmental Protection 1997 Tata. /El, Publ /A//
- SV-3. *Á. Bereczky P. Horváth A. Meggyes Ph.D.:*Crankshaft torsion of internal combustion engines, 3rd International Conference on Heat Engine and Environmental Protection 1997 Tata. /El, Publ /A//
- SV-4. *Á. Bereczky, P. Horváth, A. Horváth, A. Meggyes Ph.D.:*The importance of marking TDC during indication, Miskolc, MicroCAD '97 /El, Publ /A//
- SV-5. *Á. Bereczky, Ph.D. A. Meggyes, Gy. Hegedűs:* Optical Investigation of Heat Engines. 5th Conference on Heat Engines and Environmental Protection. May 31 - June 2 2001 Balatonfüred, Hungary.
- SV-6. *Bereczky Á.- Meggyes A* NOx kibocsátás csökkentési lehetőségeinek vizsgálata elektronikus szabályzású belsőégésű motornál, Energia Gazdálkodás 2000/I, pp.43-45.

- SV-7. *Bereczky Á.- Meggyes A.: Otto-motorok NO_x kibocsátásának modellezése. Energiagazdálkodás 40.évf. 1999. 11.sz. 40-43 old.*
- SV-8. *Bereczky Á., Hegedűs Gy., Meggyes A., Penninger A.: Modelling NO_x Emission of Spark Ignition Engines. 4th Conference on Heat Engines and Environmental Protection. May 31 - June 2 1999 Balatonfüred, Hungary*
- SV-9. *Bereczky Ákos - Meggyes Attila Dr -Csavajda Norbert: Ottó motorok gyulladási késedelmének optikai vizsgálata. GÉPÉSZET 2002, pp. 775-779*
- SV-10. *Bereczky Ákos-Meggyes Attila: Ottó-motorok NO kibocsátásának modellezése és paraméter vizsgálata. GÉPÉSZET 2002, pp. 322-326*
- SV-11. *György Hegedűs, Ákos Bereczky, Prof. Attila Meggyes: The study of procedures in internal combustion engines with assistance of computer indicating system. Gépészet 2000, pp.372-377.*
- SV-12. *Hegedűs György, Bereczky Ákos, Dr. Meggyes Attila: Számítógépes indikáló rendszer. Energiagazdálkodás 41.évf. 2000. 1.sz*
- SV-13. *Horváth P. - Bereczky Á. - Meggyes A. - Penninger A.: Belsőégésű motorok főtengely szögelszavarodásának vizsgálata üzemelő belsőégésű motorokon. Gépészet'98 Konferencia (poszter bemutató). Budapesti műszaki Egyetem 1998. május 28-29.*
- SV-14. *M.Sc. Ákos Bereczky, Dipl. Ing Mariano Cano-Wolf, György Hegedűs, Ph.D. Attila Meggyes, Ph.D. Antal Penninger: MODELLING NO_x EMISSION OF SPARK IGNITION ENGINES, GÉPÉSZET '98, 1998. pp. 565-570*
- SV-15. *Meggyes, A., Horváth, and Bereczky, Á. "Indication of Phase Delay between the Maximum Pressure and the Top Dead Center in Piston-Type Engines without Burning" 5th International Meeting at Maribor at 14-15 May 1996, Slovenia.*
- SV-16. *Meggyes, A., Horváth, and Bereczky, Á. "Indication of Phase Delay between the Maximum Pressure and the Top Dead Center in Piston-Type Engines without Burning" MicroCAD-96 Miskolc Hungary.*

Jelölés rendszer:

A	Arrhenius egyenlet preexponenciális együtthatója, vagy felszín
β	Arrhenius egyenlet polinom együtthatója
B	tüzelőanyag tömege
c	fajhő
d	derivált
Δ	differencia
E	Arrhenius egyenlet exponenciális együtthatója
h	entalpia
H_i	fűtőérték
i	működés szám
K	reakciók egyensúlyi állandója
k	reakciósebességi állandó
L	hajtórúd hossz
λ	légfelesleg tényező
M	mól tömeg
m	tömeg
m_e	alaktényező (Vibe)
n	fordulatszám
p	nyomás
Q	hő
R	egyensúlyi állandó
r	hajtókar hossz
R	mól specifikus gázállandó
T	hőmérséklet
U	belső energia
W	munka
x	mól tört, tömeghányad
κ	izentropikus állandó
τ	idő
z	hengerszám