

DERMESZTŐ HAJTÓSUGÁR ÉS 120 N TOLÓERŐ

Sugárhajtómű a rakétaindító sínen

Joó Árpád

MH 43. Nagysándor József Híradó és Vezetéstámogató Ezred, Székesfehérvár

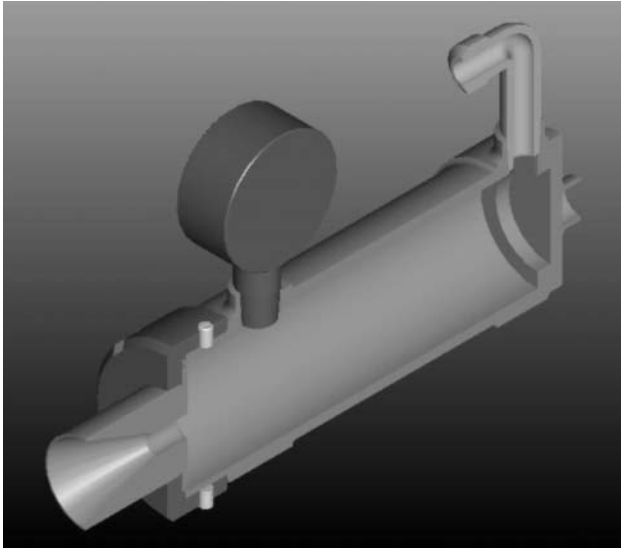
A középiskolai fizikaoktatásban vagy a tanárképzésben nem jellemző, hogy a szifonpatronon vagy a pillepalackból készült rakétán kívül más eszközzel demonstrálnák a sugárhajtást. Mindezek hiába készíthetők el egyszerűen, nem alkalmasak mérési feladatok elvégzésére, hiszen pusztán a reaktív hajtás elméletét igazolják a gyakorlatban.

Minden fontosabb, gazdaságilag prosperáló térségben a válság ellenére is zajlik az űrkutatás és ahhoz kapcsolódóan a rakétatechnika fejlődése. A világűr meghódításában pedig a reaktív hajtásnak nincsen alternatívája: „Minden nehézség nélkül felismerhető (...), hogy a légüres térben mint hajtóeszköznek páratlan jelentősége van.” [1]

A sugárhajtás, rakétahajtás és az ezekhez szükséges alapvető technikai megoldások a fizikaórákon és előadásokon fontosságukhoz mérten több megbeszélést és minőségben más kísérleteket érdemelnének.

Demonstrációs célokra, sőt kooperatív oktatási módszer központi eszközeként komplex mérési feladatok végrehajtására egy olyan eszköz fogadható el, ahol az üzemidő percekben mérhető és nincsenek a mérést nehezítő, forró füstgázok; ahol nem zajlik kémiai reakció, amely nyomásnövekedés során ellenőrizhetetlenül felgyorsulhat. A hajtóművet inert gázzal célszerű megtáplálnunk, vagy például – a látványos üzem és a mérhető paraméterek biztosítása érdekében – megfelelően nagy kamranyomást és térfogatáramot nyújtó (inert gázt tartalmazó) sűrített levegővel.

Munkacsoportunk a sugárhajtást kívánta bemutatni, működését mérésekkel kicsit közelebbről is megvizsgálni. Berendezésünket tágabban értelmezve autogén sugárhajtóműnek is tekinthetjük, hiszen ez a berendezés is egységes rendszerként foglal magába mindent, ami a hajtósugár előállításához szük-



1. ábra. A hajtóműmodell metszeti rajza.

séges. Az égéskamramodellben viszont kémiai átalakulás nem történik. Ami a kísérletekkel megvalósult: tiszta fizika.

A közepes nyomású rakétahajtóművek jellemző üzemi nyomástartományára H. Mielke szerint „20–50 atmoszféra” [2] közé esik. Biztonsági okokból mi is ezt a tartományt céloztuk meg.

A berendezés bemutatása dióhéjban

A munkavégző gáz sűrített levegő, amelyet egy 46 l-es, 6,9 m³ gáztérfogatú levegőpalack biztosít, reduktor nélkül. A palack mint *hajtóanyagtartály* fogható fel, tehát a tolóerővel egyenesen arányos dm/dt kiáramlási sebességű *tömegsugár* is tisztán hideg levegőből áll, így az fulladás veszélye nélkül teszi lehetővé a zárt térben való alkalmazást. A palackot hidraulikus köti össze a kamra bevezetésével.

Az *égéstér modell* egy hidraulikus munkahenger, amelynek anyagminősége, falvastagsága kizárják a fizikai robbanás lehetőségét; rendeltetéséből adódóan több száz bar nyomásig használható (1. ábra). A henger lezárásának furatába helyeztük be a bronzból készült, cserélhető, pontosan illeszkedő *fúvócsövet*, amelynek peremét a kamranyomás préseli a lezáráshoz. A két gyári, nyomásálló csatlakozó közül az egyiket vezettük be a munkavégző gázt, a másikhoz pedig nyomásmérő órát csatlakoztattunk, amely egy csőrugós *manométer* 2 bar-os osztásokkal.

Kettő fúvócsövet készítettünk úgy, hogy azok a katonai célú kiserakétákra jellemzően a „kettős kúpos alakú fúvóka” [3] kialakításához állnak a legközelebb; a szűkülő részt viszont elhagytuk, így vált lehetővé a táguló rész megfelelőbb kialakítása. Ezzel meg tudtuk oldani, hogy a táguló rész 21°-os fél nyílásszöge közelítsen az ideális értékhez, amely a hivatkozott szakirodalom szerint „12° és 18° közt van” [4]. A másik kettő fúvócsövet pedig táguló rész nélkül alakítottuk ki. Két fajta keresztmetszetet választottunk:

6 mm és 11 mm átmérővel. A fúvókák kialakítása felelős a zajátalomért, ami azonban hallásvédő eszközzel kivédhető.

Az *erőmérőhöz* megfelelő rugók felkutatása, összehasonlítása során egy 150 mm-es nyomórugót választottunk. Mérlegsúlyok segítségével az elért összenyomódások és mérések ismételtetésével meghatároztuk az átlagos direkciós erőt ($D = 13,26$ N/cm), ezt az átlagot tekintjük rugóállandónak. Ennek ismerete lehetővé teszi, hogy a modell által összenyomott rugó hosszából számítsuk a tolóerőt.

Célok

A *sugárbajtás elvét*, a működés *mechanikai alapjait* a gyakorlatban, közvetlen közelről kívántuk bemutatni, akár *egy pedagógiai projekt* részeként. A legfontosabb mutatószámokat (tolóerő, nyomás és üzemiidő) színté „kézzelfoghatóvá” akartuk tenni oly módon, hogy egy igazi *sugárbajtómű* és a *gyakorló modell* közötti határok elmosódjanak. Az üzemeltetéssel mód nyílhat újszerű tevékenységek elsajátítására, hiszen az említett mutatószámok mindenki által mérhetőek. Különböző típusú és legszűkebb keresztmetszetű fúvócsöveket alkalmazva képesek vagyunk megvizsgálni, hogy miként változik a kamranyomás, a tolóerő és a közepes tömegáram.

Motiváció

Az elvégzett indítások, megfigyelések és a beszámoló során bebizonyosodott, hogy a demonstrációs hajtóművel való munka és a videofelvétel is motiváló hatású. Ez igaz mind a kísérletek előtti (tervezési), mind pedig az azt követő (elemzési) időszakokra. Egy olyan hajtómű, ami rögzített pályán el tud mozdulni, működését pedig erős hanghatás és a környező levegő hőmérsékletének zuhanása kíséri, sőt aminek a hajtósugarát a diákok akár meg is „érinthetik” egyértelműen *felkelti és fenntartja az érdeklődést*. Izgalmas projektoktatás valósítható meg, hiszen a működtetést megelőzően a csoport tagjainak külön mérési feladatok adhatók ki, felelősöket jelölhetünk ki, a közösen elvégzett indítást pedig előre meghatározott szempontok szerint, közösen értékeljük.

A dolgozó hajtómű

A hajtóműmodellel végzett *nyolc kísérleti indítás* során született mérési adatok képezik az írás alapját.

Az esetlegesen leváló szilárd szennyeződések ellen arcvédő sisakkal védekeztünk. A palack szelepét teljesen kinyitva a dolgozó hajtómű az első 14 s alatt elérte a maximális kamranyomást – közben tolóerejének megfelelő mértékben összenyomta a rugós erőmérő (ismert direkciós erejű) nyomórugóját –, valamint a legnagyobb gázkiáramlási sebességet és tömegáramot (hajtóanyagáramot) is. A manométert és a

stoppert figyelve kiderült, hogy melyik pillanatban érte el a kamra a legnagyobb nyomást. Természetesen ugyanakkor mértük a rugó maximális összenyomódását is. A hajtóműmodell működése regresszív – visszafejlődő – jellegű, vagyis a fontosabb mutatószámok értékei hamar elérik a maximumot, majd csökkenést mutatnak. A palackot addig ürtettük és az időmérés is addig végeztük, amíg a szelepen át érzékelhető volt az áramlás.

Mérési feladatok

Próbapadra helyezett rakétahajtómű esetén a szakirodalomhoz hűen elsősorban a \dot{G} -tal jelölt hajtóanyag-áramot, és a P -vel jelölt tolóerőt kell meghatározni. Esetünkben a tolóerőt abban a rövid időszakban vizsgáltuk, amikor elérte maximális értékét.

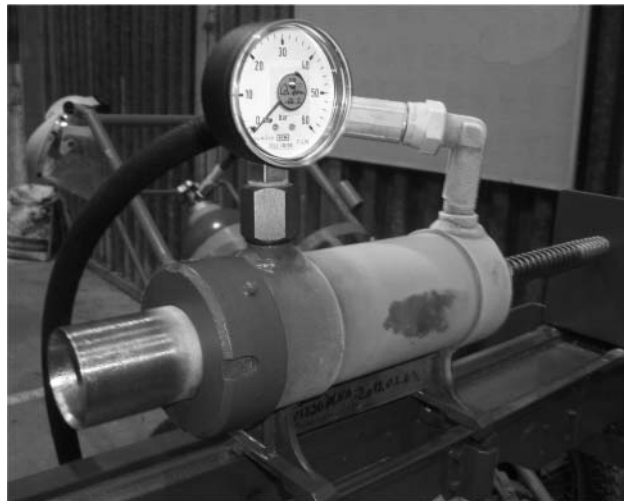
Drága ipari mérőberendezés híján a palacknyi töltet tömegének ismeretében, a kamra pillanatnyi nyomása és a teljes üzemidő mérése után a közepes hajtóanyagáram értéke mellett, a 8. indítást vizsgálva a tömegáram, továbbá a kiáramlási sebesség értékét is meghatároztuk.

Az égéskamrát egy néhai páncéltörőrakéta-rendszer indítósínjén, vízszintesen helyeztük el (2. ábra). Modellünk a sínen csúszva röviden elmozdult. Ezt az x_{\max} utat, vagyis a rugós erőmérő rugójának összenyomódását mértük. Ideális esetben ebből és a már meghatározott D direkciós erő segítségével kiszámíthattuk a hajtómű P_{eff} tolóerejét:

$$P_{\text{eff}} = D x_{\max}.$$

Gyakorlatban azonban figyelembe kell venni az elmozduláskor fellépő F_s súrlódási erőt is, így a P_{effm} módosított tolóerő:

$$P_{\text{effm}} = D x_{\max} + F_s.$$



2. ábra. A kész modell egy mérés után.

F_s csúszási súrlódási erőt lemérve értékére 6,75 N-t kaptunk. Az 1. táblázat tartalmazza x_{\max} , P_{eff} és P_{effm} értékeit. A manométerről leolvastuk a maximális kamranyomást.

Az üzem utolsó perceiben a tömegsugár hőmérsékletét mértük megfelelő üveghőmérővel.

A 8. számú próba üzemnyomás-vizsgálata

Az indítások közül a nyolcadik viszonylag magas mért értékeket adott. Az 1. táblázatból láthatjuk, hogy a tolóerő megközelítette a 120 N-t, a kamranyomás pedig elérte a 35 bart, a működési idő a legrövidebb volt: a rendszer elérte teljesítőképessége határát. A működés jellegzetes lefutása miatt célszerűnek tűnt annak nyomásvizsgálata. Videofelvétel segítségével, a szelep teljes kinyitásától, manométeren követtük nyomon az üzemi nyomás exponenciális csökkenését. Az értékeket szabályos időközönként lejegyezve, azokat táblázatba foglalva és a nyomás-

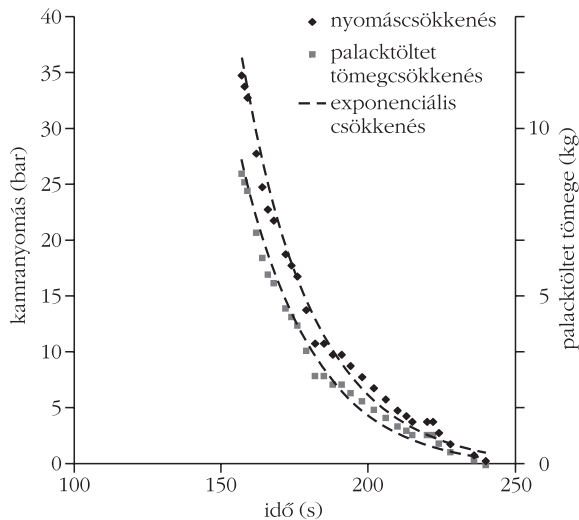
1. táblázat								
Elvégzett kísérletek mérési eredményei és egyes számított értékek								
próba sorszáma	p_{\max}^{kamra} maximális kamranyomás (bar)	x_{\max} maximális összenyomódás (cm)	P_{eff} tolóerő, reakcióerő (N)	t teljes üzemidő (s)	\dot{G} közepes hajtóanyag-áram (kg/s)	F_i akcióerő (N)	P_{effm} módosított tolóerő (N)	fűvócső minimális átmérője (mm) és típusa
3. ¹	12	~2	~26,5	–	0,034	34	33,25	6 – kettős kúpos
4. ¹	10	2,1	27,85	280	0,034	28,3	34,6	6 – kettős kúpos
5. ¹	20,0	4,3	57,03	–	0,034	56,6	63,78	6 – kettős kúpos
6. ²	33	6,8	90,20	180	0,049	93,4	96,95	6 – konvergáló
7. ³	9	5,6	74,27	156	0,057	85,5	81,02	11 – kettős kúpos
8. ⁴	35	8,4	111,41	165	0,053	99,05	118,2	6 – kettős kúpos

¹ Teljesen és fokozatosan nyitott szelep; az erőmérőbe csapódik; hatékonyabb tömítések.

² Teljesen nyitott szelep; hatékonyabb tömítések; az erőmérőtől indul; szelep kinyitása 12 s alatt.

³ Teljesen nyitott szelep; hatékonyabb tömítések; erőmérőtől indul; szelepnitítás 14 s alatt.

⁴ Teljesen nyitott szelep; hatékonyabb tömítések; az erőmérőtől indul; szelepnitítás 12 s. Tömegsugár hőmérséklete: $T = -25$ °C. Számított kiáramlási sebesség a 14. s-ban $c = 94,56$ m/s.



3. ábra. A nyomás, valamint a palacktöltet tömegének csökkenése az idő függvényében a 8. próba videofelvétele alapján. Szelepnýtás a 158. másodpercben, jól látható a regresszív jelleg exponenciális viselkedése.

csökkenést az idő függvényében ábrázolva, kijelenthetjük, hogy a működés jellege besorolható a regresszív kategóriába (3. ábra).

Fontosabb számítások

A rugós erőmérő nyomórugójának összenyomódása, a direkciós erő, az égéskamra manométerről leolvasható maximális nyomásértéke és a teljes üzemidő, vagyis a palackban foglalt „hajtóanyag” elfogyasztásának (a palack kiürítésének) időtartama képezték a számítások alapját. Továbbá felhasználtuk a gáztöltet kezdeti hőmérsékletét, tömegét (vagyis a hajtótöltet tömegét), a palack térfogatát, a gáz standard állapotra megadott térfogatát és a környezeti levegő hőmérsékletét.

Akcióerő számítása (és a rugós erőmérő ellenőrzése)

A hivatkozott szakirodalomhoz hűen P -vel jelölt tolóerő egyenesen arányos az időegység alatt kidobott gázmennyiséggel (tehát a \dot{G} -tal jelölt hajtóanyag-fogyasztással) és a kiáramlás sebességével a nagyon általános $P = \dot{G}c$ összefüggés értelmében. A kamrát, a fúvócső legszűkebb keresztmetszetét és a torkolat kialakítását, végül pedig a környezetet kellene a jelenség tárgyalásakor figyelembe venni. Egyszerűsítsünk úgy, hogy a külső nyomásból eredő külső erő hatásától eltekintünk – a tolóerő értékéhez úgy is eljuthatunk, hogy a kamra nyílásának (vagyis itt a fúvócső legszűkebb) A_{\min} keresztmetszetét megszorozzuk a kamra rá nehezedő p_{\max}^{kamra} maximális nyomásával. A tömegsugarat létrehozó gázközeg nyomását alapul véve a kamrában ez az F_t erő:

$$F_t = p_{\max}^{\text{kamra}} A_{\min},$$

vagyis nyomóerő – mint a kamra A_{\min} nyílására, a fúvócső legszűkebb keresztmetszetére irányuló erő –

annál nagyobb, minél nagyobb a p_{\max}^{kamra} kamranyomás és a minimális keresztmetszet szorzata.

A 6. számú próbánál alkalmazott fúvócső legszűkebb keresztmetszete $A_{\min} = 2,83 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$, a maximális kamranyomás $p_{\max}^{\text{kamra}} = 33 \text{ bar}$, így az akcióerő értékére $F_t = 93,4 \text{ N}$ -t kaptunk. Ezt összevetve (az ellentétes irányú) $P = 96,95 \text{ N}$ tolóerőadattal, láthatjuk, hogy a számítás csupán 3,5 N-nal adott kisebb értéket, azaz a rugós erőmérőnk összenyomódásából számított reakcióerő jó közelítéssel elfogadható érték.

Az első másodpercek tömegárama és kiáramlási sebessége a 8. számú próba során

A kamra pillanatnyi p^{kamra} nyomása, annak változása sok információt hordoz a működés jellegéről, és minden mással, így például a hajtóanyagáram pillanatnyi értékével is kapcsolatban van. A 8. indítás nyomásadataiból kiindulva, a palack töltettömegének ismeretében ez utóbbi csökkenése is felírható (3. ábra). A szelepnýtástól számított 14. és 16. másodperc között eltelt intervallumot vizsgálva a kamra nyomása $p^{\text{kamra}}(14 \text{ s}) = 19 \text{ bar}$ értékről $p^{\text{kamra}}(16 \text{ s}) = 18 \text{ bar}$ -ra, míg a palack töltet tömege az $m(14 \text{ s}) = 4,77 \text{ kg}$ -ról $m(16 \text{ s}) = 4,52 \text{ kg}$ -ra csökkent. Ezekből a valós értékhez közelítő $\dot{G} = 0,125 \text{ kg/s}$ hajtóanyagáramot kaptunk. A 8. próba során mért és pontosan meghatározott $P_{\text{effm}} = 118,2 \text{ N}$ tolóerejét felhasználva a nagyságrendileg érvényes $c = P_m / \dot{G}$ kiáramlási sebesség legfeljebb 94,56 m/s.

A Joule–Thomson-hatás érvényesülése

A palackban 150 bar nyomáson és 15 °C hőmérsékleten tárolt sűrített levegőt a csővezetéken, a kamrán és a fúvócsövön keresztül a környezetbe juttattuk, így nyomása néhány perc alatt lényegében a légköri nyomásig csökkent.

A fúvócső torkolatából kiáramló levegő hőmérséklete a torkolatától néhány cm-re (mérés szerint): $T = -25 \text{ °C}$ volt. A Joule–Thomson-hatás egyenletével számolva a hőmérséklet-csökkenés $\Delta T = -37 \text{ °C}$ kell legyen. Az eredmény reális, hiszen közel van a mért -40 °C -os értékhez.

Ezzel egyrészt megállapítottuk hőmérséklet-méréssünk pontosságát, másrészt rávilágítottunk arra, hogy a nevezett hatás leírásával egyezően a torkolatból kilépő gázkeverék nyomása 1 bar-hoz közelít.

Összefoglalás, következtetések

A szerkezet le tudja győzni a mintegy 9 N tapadási súrlódási erőt és önállóan képes elmozdulni a sínen. Működési ideje elegendő hosszú ahhoz, hogy különböző méréseket végezzünk rajta.

Olyan fúvócsöveket terveztünk és alkalmaztunk sikerrel, hogy jól észlelhető különbségeket mutassanak a mérési eredmények, így például az átengedett levegő (tömegáram) mennyiségei is.

A tömegáram-különbségek hatásai

Az 1. táblázat mérési és számított adatai szerint a teljes üzemiidők változtatásával – a szelep állásának és a behelyezett fúvóka típusának megfelelően – különböző lefutású működéseket tudunk megvalósítani. Mindegyik regresszív jellegű volt, ám különböző hosszúságú üzemiidővel. A szelep állásától függően az eltérő üzemiidők egyben különböző nagyságú közepes hajtóanyagáramot jelentettek (a legnagyobb számított érték a 0,053 kg/s volt).

Amikor a szelepet teljesen kinyitjuk, a 8. számú próbánál az a lehető legnagyobb tömegű levegőt tudta átengedni, így 165 s alatt adta le azt a levegőmennyiséget, amelyre a 4. számú próbánál kétszer ennyi időre volt szükség. A közepes tömegáram elérte 0,053 kg/s-ot, a kamranyomás a 35 bart és jelentősen, 8,4 cm-rel nyomódott össze az erőmérő rugója.

A fúvócső legszűkebb keresztmetszet és típus hatásai

A fúvókacserékkel jól kimutathatóan változott a nyomás és a tolóerő, velük pedig a számított értékek. A legszűkebb keresztmetszetek különbségeit számba véve jól látszik, hogy a 7. számú próbánál alkalmazott 11 mm-es kettős kúp alakú fúvócsővel nem tudtuk azokat az értékeket elérni, mint a 8. próba 6 mm-esével. Az előbbi próbánál a kamranyomást nem lehetett 10 bar fölé emelni, ezért hiába jelentene a nagyobb (legszűkebb) keresztmetszet nagyobb tolóerőt (az $F_t = p_{\max}^{kamra} A_{\min}$ összefüggés miatt), ha közben a fúvóka nincs „kihasználva” (a nyomás a torkolatban nem csökken a kritikus értékig sem). Ezáltal a 7. indítás tolóereje meg sem közelíthette a 8. mintegy 120 N-os értékét.

A 6. és 8. próba során a kamranyomás közel ugyanakkora volt, viszont a rugó összenyomódása, így a tényleges tolóerő jelentősen eltért egymástól (a 8. során

elérte a 118 N-t). A mérés körülményei megegyeztek, a fúvókák viszont kialakításukban különböztek.

35 bar kamranyomásig az eszköz – bizonyítottan – megbízhatóan alkalmas többféle – dinamikai, hőtani stb. – mérési feladat elvégzésére, ezáltal számos összefüggés gyakorlatban történő igazolására. A rugós erőmérő és a manométer segítségével alapvető mérések, következtetések is elvégezhetők. Kiindulásként bemutatható a paraméterek függése a manométer által mutatott nyomásértékektől. Magasabb szintű képzéseken a mérési adatokból akár olyan számítások is elvégezhetők, mint kiáramlási sebesség, fajlagos impulzus, hajtósugár energiája, hajtóanyagáram, a hőmérséklet csökkenése révén belsőenergia-változás számítása stb.

Egyéni hallásvédő eszközök biztosítása esetén a berendezés alkalmas kisebb csoportok előtt bemutató mérések megvalósítására, sőt egy komplex téma, a *sugárhajtás elmélete és gyakorlata teljes körű feldolgozására* és további vizsgálatok elvégzésére. Munkahelyemen mindezért rakétatechnikai szakképzések ez évi képzési programja keretében a rakétahajtóművek általános működésének demonstrálására hajtóművünket már több alkalommal beüzemeltük.

Láthattuk, hogy megfelelő nyomáson betáplált gázközeggel *képesek vagyunk nagy energiatartalmú, ám robbanásveszélyes, vagy mérgező hajtóanyagokat helyettesíteni*, amennyiben a kamranyomást és a fúvókát helyesen megválasztva sikerül kialakítani a megfelelő üzemi viszonyokat.

Irodalom

1. H. Mielke: *A rakétatechnika alapjai*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1962. 22. old.
2. U.o. 99. old.
3. Nagy E.: *Rakétajárművek*. Táncsics Könyvkiadó, Budapest, 1968. 15. old.
4. H. Mielke, id. mű. 90. old.