



**Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem
Bolyai János Katonai Műszaki Kar
Repülő és Légvédelmi Intézet**



**Fedélzeti Rendszerek Tanszék
Repülőfedélzeti Fegyvertechnikai szakirány**

REPÜLŐFEDÉLZETI RAKÉTÁKON ALKALMAZOTT HAJTÓMŰVEK

SZAKDOLGOZAT

Készítette:

NÉNINGER ATTILA HALLGATÓ

Konzulens:

Szilvássy László okl. mk. alez.

Dr. Szabó László nyá. okl. mk. alez.

**SZOLNOK
2008.**

ZRÍNYI MIKLÓS NEMZETVÉDELMI EGYETEM
BOLYAI JÁNOS KATONAI MŰSZAKI KAR
Fedélzeti Rendszerek Tanszék

J ó v á h a g y o m !
Szolnok, 2007. május 31.

.....
tanszékvezető

SZAKDOLGOZATI FELADAT

Néninger Attila

repülőfedélzeti fegyvertechnikai szakos
hallgató részére

1. Feladat:

Repülőfedélzeti rakétákon alkalmazott hajtóművek

2. Elkészítendő:

- A rakéta hajtóművek kialakulása;
- A rakéta hajtóművek csoportosítása;
- A rakéta hajtóművek felépítése, működése.

3. A szakdolgozatot konzultálja: Szilvássy László okl. mk. alez.

Dr. Szabó László nyá. okl. mk. alez.

4. Beadási határidő: 2008. április 30.

5. A kidolgozáshoz javasolt eszközök és irodalom:

- A repülőfedélzeti fegyverberendezések működésének és üzemeltetésének alapjai I. könyv (920/531 szabályzat)
- Zsilák András mk. alez.: Repülőgép-fedélzeti fegyverek megsemmisítő eszközei, 598/479, KGyRMF, 1984,
- Idegen hadseregek katonai repülőerőiben rendszeresített főbb fedélzeti pusztítóeszközök (Id/16 szabályzat)
- A repülőfegyverzet üzembentartásának elméleti alapjai IV. Repülőlőszerrek (Re/997)
- Gunston, B. Korszerű harci repülőgépek fegyverzete, Zrínyi Kiadó 1995
- Nagy István György – Lőrincz István Rakéatechnika – Rakétafegyver, Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest, 1969
- Papp Bálint – Nagy István György – Dr. Tamási Zoltán Rakétafegyver, Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest, 1962

- Nagy István György – Szentesi György Rakétafegyverek, űrhajózási hordozó-rakéták, Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest, 1983
- Szurikov mérnök ezredes Rakéták a harcban, Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest, 1967
- A témával foglalkozó szakdolgozatok, tanulmányok, doktori dolgozatok és Internetes oldalak.

6. A szakdolgozat elkészítésének ütemterve:

Ssz.	Feladat megnevezése	Határidő	Megjegyzés
		Aláírás	
1.	A megadott irodalom tanulmányozása, rendszerezése, egyéb források felkutatás	2007. 09. 30.	
2.	Önálló kutatás	2007. 10. 31.	
3.	A szakdolgozat vázlatának elkészítése	2007. 11. 30.	
4.	A szakdolgozat kéziratának elkészítése	2008. 02. 28.	
5.	Ábrák, fényképek fóliák, stb. elkészítése	2008. 03. 31.	
6.	A szakdolgozat bemutatása a konzulensnek	2008. 03. 31.	
7.	A szakdolgozat végleges formába öntése és bekötetése	2008. 04. 15.	
8.	A szakdolgozat leadása	2008. 04. 30.	

Szolnok, 2008. hó-n

.....
hallgató

Egyetértek!

.....
konzulens

7. A konzulens javaslata:

A szakdolgozat a formai és tartalmi követelményeknek

megfelel **nem felel meg**

ezért elbírálását

javaslom **nem javaslom**

Szolnok, 2008. hó-n

.....
konzulens

A szakdolgozat értékelés

8. Összefoglaló bírálat:

Javasolt osztályzat:

2008. hó-n

.....
bíráló

9. A záróvizsga bizottság döntése:

A szakdolgozatot eredményűnek minősítjük.

Szolnok, 2008. hó-n

.....
ZV bizottság elnöke

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	6
1. A RAKÉTAHAJTÓMŰVEK KIALAKULÁSA.....	7
1.1. Gázturbinás hajtóművek.....	11
1.2. Torlósugár-hajtóművek	12
2. A RAKÉTAHAJTÓMŰVEK CSOPORTOSÍTÁSA	14
2.1. Hibrid hajtóanyagú rakétahajtómű.....	19
3. A RAKÉTAHAJTÓMŰVEK FELÉPÍTÉSE, MŰKÖDÉSE	21
3.1 Szilárd hajtóanyagú rakétahajtómű	21
3.1.1. <i>Piropatron működése</i>	25
3.1.2. <i>A tolóerő meghatározása</i>	26
3.1.3. <i>A töltet égése és hajtóanyag formák</i>	30
3.1.4. <i>Szilárd hajtóanyag égésének folyamata</i>	33
3.1.5. <i>Nyomás az égőtérben</i>	37
3.1.6. <i>Nyomás és sebesség az égőtérben</i>	39
3.1.7. <i>Egyfokozatú és kétfokozatú hajtóművek</i>	42
3.1.8. <i>Szilárd hajtóanyagok és formák</i>	44
3.2. Folyékony hajtóanyagú rakétahajtómű	46
3.2.1. <i>Hűtési módok</i>	47
3.2.2. <i>Táprendszerek</i>	48
4. SZILÁRD ÉS FOLYÉKONY HAJTÓANYAGÚ RAKÉTÁK	
ÖSSZEHASONLÍTÁSA.....	49
ÖSSZEFOGLALÁS.....	50
FELHASZNÁLT IRODALOM	52

BEVEZETÉS

Dolgozatom témája a repülőfedélzeti rakétákon alkalmazott hajtóművek.

Elsősorban a rakéták megjelenéséről és a rakétahajtóművek kialakulásáról lesz szó, mely egyfajta történeti bemutatást, elemzést biztosít a témáról. A szakirodalom rengeteg történelmi helyszínt és fontos feltalálókat említenek, ezért a pontos meghatározás igen nehéz. A tanulmányozás során talákoztam sikeres, a mai napig remekül hasznosítható elméletekkel és azok gyakorlatba való átültetésével, viszont rengeteg kutatómunka kudarcba fulladt és olykor sajnálatos módon a kísérletező tudós életével fizetett érte.

A második fő témakör a hajtóművek csoportosítását foglalja magába. A rakétahajtóművek a reaktív hajtóművek hármass csoportjának egyik tagját képezik. A csoportosítás során bő ismertetésre nem kerül sor hiszen, mint tudjuk, a reaktív hajtóművek csoportjai közé tartozik a kombinált hajtómű is, ami a hajtóművek konstrukciós megoldásainak számtalan lehetőséget biztosít. Említésre kerülnek a főbb fizikai törvényszerűségek, amelyek a rakéta mozgását magyarázzák. Felsorolás szintjén találkozunk a levegőt nyelő (aerob) hajtóművekkel, illetve a levegőt nem nyelő (anaerob) hajtóművekkel. Részleteiben bemutatásra kerül a hibrid hajtómű is, mely lényegét tekintve a két fő csoport (SzHRH és FHRH) kedvező tulajdonságait egyesíti szerkezetében.

Végül témám utolsó fő fejezetében a rakétahajtóművek felépítése, működése kerül kifejtésre. A bemutatás során a szilárd hajtóanyagú rakéták működési tulajdonságait helyeztem előtérbe, hiszen ez a legelterjedtebb csoport a rakétahajtóművek körében. Tárgyalásra kerülnek a főbb szerkezeti egységek, a töltet égése és a hajtóanyag formái. Az égési folyamatok során említésre kerülnek azon feltételek, melyek a labilis égési folyamatok kiküszöbölését segítik. A fejezetben belül foglalkozni fogok a második legjelentősebb hajtómű-csoporttal: a folyékony hajtóanyagú rakétahajtóművekkel. Szintén kiemelésre kerülnek ezen hajtóművek fő szerkezeti egységei, illetve a csoportra vonatkozó sajátos tulajdonságok és a különböző hűtő- illetve táprendszerek is bemutatásra kerülnek. A harmadik fő rész zárásaként szilárd és folyékony hajtóanyagok összehasonlítására kerül sor főbb szempontok alapján.

1 A RAKÉTAHAJTÓMŰVEK KIALAKULÁSA

A rakéták alkalmazását történetük során rengeteg eseményhez kötik. Fejlődésük történeti állomásaival kapcsolatban nincsenek általánosan elfogadott, bizonyított álláspontok.

Már Aulus Gellius római író említése szerint Archytas görög matematikus i.e. 400 körül egy galambutánzatot készített, amelyet a „belezárt és elrejtett” levegő hozott működésbe. A működési elv magyarázata, hogy a madárforma egy vízforralásra alkalmas edényt rejtett. Amint a gőz a szerkezet hátulján eltávozott, ez reaktív hatást kifejtve mozgásba hozta a galambutánzatot, amelyet valószínűleg egy fonállal függesztettek fel és amely így körbe-körbe forgott, repkedett.

A másik –talán kezdetlegesnek tűnő, de működési elve alapján a fentihez hasonló módon szintén rakétának nyilvánítható- szerkezet neve Aeolipila.



1. ábra Aeolipila [8] [Néninger Attila–MSPaint]

Ez egy vízzel töltött, vízszintes tengely körül forgó félgömb. A gömbből egymással átellenben derékszögben meghajtott kivezetőcsövek vannak felforrasztva oly módon, hogy a kivezetések egymáshoz képest ellentétes irányba mutatnak. A gőzképződéskor csöveken távozó víz aztán megmozgatja a gömböt, ezért ez a kis szerkezet tulajdonképpen a gőzturbina őséneke is tekinthető, ahogyan rakétának is nyugodt szívvel nevezhető.

Az említett ókori eszközök mai értelemben vett gyakorlati célokat nem szolgáltak, sok más szerkezethez hasonlóan templomokban és zárdahelyeken a jámbor hívők bámulatba ejtésére használták őket, a technika történeti szempontjából mégis nagy a jelentőségük. Bizonyosságot tesznek arról, hogy az ember már két és félezer évvel ezelőtt foglalkozott azzal, hogy **reaktív hatással** hozzon testeket mozgásba.

A mai rakéták ősi formái kínai eredetűek, s ezen „tüzes nyilak” története egészen 1232-ig nyúlik vissza. A legenda szerint a mongolok ellen a kínaiak több száz méter lőtávolságú nyilakat használtak, amelyek a tűzijáték rakétájához hasonló eszközök segítségével váltak ilyen hatékony fegyverekké. A mongolok után ellesték a készítésének a titkát, és csakhamar elterjedt a használata Európában is, ahol már a XVII. századra a gyújtórakéta is gyakorta használt harceszközzé vált, még ha ezek minősége csak az akkori kor követelményeinek felelt meg csupán, s például a lőporok fejlődését sem tudták követni.

Nem ilyen volt az 1717-ben kidolgozott orosz jelzőrakéta, amelynek szerkezete több mint másfél évszázadon át megfelelt a célnak, azon mit sem kellett alakítani.

Az indiaiak 5000 fős rakétalövész-alakulatának eredményei pedig az angol Congreve figyelmét keltették fel, aki tudományos szempontok alapján fejlesztette tovább a rakétát. A pontos kutatásoknak eredménye is volt. A napóleoni háborúk idején sikeresen kerültek alkalmazásra a nagyobb rakéták mintegy 10 kg-os robbanótöltettel, melyeknek a hatótávolsága megközelítette a 3 kilométert is. A Congreve által fejlesztett rakéták rohamos léptekben árasztották el Európa hadseregeit, majd természetesen az Egyesült Államok seregeihez is eljutottak a fejlesztés eredményei.

A rakétafegyverek történetének magyar vonatkozásait tekintve említésre méltó Bem József 1820-ban megjelent könyve, amely mű a rakétairodalom egyik klasszikusa.

Az 1848-as szabadságharc során került kifejlesztésre az első magyar rakéta, ami egy osztrákoktól megszerzett rakétavető továbbfejlesztése volt. Ezen Mózer Sándor-Szkopál József páros munkája által megszerkesztett röppentyűk főleg gyártástechnológiájukban tértek el az osztrák mintától. Ez tekinthető az első lépésnek, ami után 1849-ben nagyszabású fejlesztési és gyártási tevékenység kezdődött, aminek eredményeként ugyanezen év végén már 16 rakétavető állt a magyar csapatok rendelkezésére.

Az itt is használatos röppentyűrudak kiküszöbölése azonban a magyaroknak úgy, mint az angoloknak, osztrákoknak is fejtörést okozott. Mindenáron egy forrásstabilizált rakéta létrehozása volt a cél, amely eredményt elsőként William Hale angol rakétaszerkesztő ért el 1944-ben. Ezeket a Hale-rakétákat a turbinaszerrű fúvócsövön kiáramló gázok a hossz tengely körül forgatták. Az osztrákok 1960-ban meg is vásárolták ezt a találmányt, átszerkesztették és rendszeresítették.

Az bekövetkezett fejlesztések, tudományos előrelépések ellenére az elkövetkező 60-70 évben mégsem szívesen alkalmazták a háborúban rakétákat, hisz a lövegekhez képest még mindig jóval gyengébbnek bizonyultak mind tüzérségi, mind találati pontosság tekintetében. Az viszont, hogy használatuktól eltekintettek, korántsem jelentette, hogy a kísérletezésekkel is alábbhagytak volna. Bár tény, hogy a motorhajtású Whitehead-féle torpedók megjelenése után nem látták értelmét a nem irányítható rakéták által hajtott tengeralatti harceszközök kifejlesztésének.

A léghajózás megjelenésével (1800-as évek vége) kezdődött a rakétahajtású repülőgépek kísérleteinek időszaka, amelynek egyik korszakalkotója Ciolkovszkij volt, aki a „A világűr kutatása rakétákkal” című művében számos olyan alaptételt fektetett le, amelyek nélkül elképzelhetetlen a mai rakéta-tudomány vagy az űrhajózás. Kortársával, Mescserszkij professzorral – aki többek között a változó tömegű testek dinamikájának elméletét dolgozta ki, ők a mai orosz rakétatudomány megalapozói.

A rakéta, mint fegyver további fejlesztésére az első világháború után Németországban került sor, s a második világháborúban már új, korszerű típusok jelentek meg, amelyek már tartalmazzák azokat a modern szerkezeti elemeket, amelyek a korszerű rakétát az őseitől megkülönböztetik.

Sorozatvetőkön kívül a második világháború bemutatkozási tere volt még a páncéltörő rakétafegyvereknek, egyes légvédelmi és repülőgépfedélzeti rakétáknak, irányítható repülőbombáknak, irányítható lövedékeknek.

Igen nagy tüzereje volt az úgynevezett „sztálin-orgonának”, a BM-13 sorozatvetőnek, mely egy viszonylag egyszerű és könnyű szerkezet volt, így nagy minőségi változást jelentett a korábbi, nehézkes fegyverekhez képest. Ami a német tüzérségi rakétafegyvereket illeti, kis tüzerejű rakéta-sorozatvetővel rukkoltak elő, aminek „kődvető” volt a neve, mert ködfejlesztő (valamint vegyi) töltet indítására is alkalmas volt.

A páncéltörők közül említésre méltó a szovjet RSz-65, amit 1931-ben készített Petropavlovskij. Az amerikaiak kézi páncéltörő rakétafegyvere a bazooka egy kísérleti Goddard-rakéta továbbfejlesztéseként született meg. Természetesen a németek is rendelkeztek ehhez hasonló fegyverrel, s a Panzerschreknek később egy utánfutóra szerelt vetőszerkezetes változata is megjelent.

A fent említett, újonnan bemutatkozó fegyverek következő csoportja, az irányítható lövedékek közé tartoznak a V-fegyverek. A V-1 egy szárnyas irányítható lövedék, melyet lüktető sugárhajtómű mozgat. Felderítése és elpusztítása azonban a háború vége felé már elérte a 70 %-os arányt.

A V-2 kialakításához a németek 1933-ban kezdtek hozzá. Ez a fegyver egy másik rakétacsalád (A-rakéták) negyedik tagjaként látta meg a napvilágot. Hatótávolsága meghaladta a 300 km-t, 100 km magasságba emelkedve, 1,8 km/s sebességgel haladva. Felderítési és elpusztítási arányát jellemzi, hogy a London ellen indított 2351 V-2 közül 1590 célba is ért.



2. ábra V-2 ballisztikus rakéta [8]

Az „A-család” folytatásaként kialakításra került A-9, például a V-2 módosított változata, s ez egybeépítve az indítófokozatul szolgáló A-10-zel már mintegy 5000 km-es hatótávot ért volna el, mely -vagy melyhez hasonló- interkontinentális rakéta kifejlesztésére végül nem Németországban, hanem Amerikában került sor, jóval később.

A Szovjetunióban pedig már 1957 augusztusában megszületett az első nagy hatótávolságú interkontinentális rakéta, októberben pedig elindították az első szputnyikot, vagyis elkezdődött az űrkorszak.

A hajtóművek fejlődésében az utóbbi évtizedekben nagy fejlődés ment végbe. Nagy mértékben megnöttek a repülőgép-fedélzeti lokátorok célfelderítési és célfogási távolságai, illetve módosultak a fedélzeti rakéták irányító rendszereinek hatótávolságai. A fejlődésnek köszönhetően csökkent a rakétába épített berendezések mérete és tömege. A fejlesztések fő szempontja az volt, hogy a rakéta geometriai mérete ne változzon nagy mértékben, viszont a korszerű berendezések segítségével teljesítménye jelentős mértékben javuljon (nagyobb hatótávolság, sebesség stb.). A repülőgép-fedélzeti légiharc-rakéták hatótávolságának és célmegközelítési sebességének növelése fontos, mert az ellenséges légitűzveg megsemmisítésére annak a támadó repülőgépnek van jobb esélye, amelyik a 80-120 km távolságon felderített légitűzveg nagyobb indítási távolságról (59-100 km) és a célt gyorsabban megközelítő rakétákat képes indítani leszűkítve ezzel az ellenséges gép manőverezési lehetőségeit. A "levegő-föld" rakétáknál a nagyobb rakéta-indítási távolságok kiemelkedő fontossága, hogy a támadó gép az ellenséges légvédelmi zónán kívülről tud rakéta-indítást végrehajtani, így nem ad lehetőséget esetleges ellencsapásra. A jelenlegi repülőgép-fedélzeti rakéták nagy többsége (kb. 90%-a) szilárd hajtóanyagú rakéta-hajtóműves, a folyékony hajtóanyagú rakétahajtóművet szerkezeti összetettsége miatt ritkábban alkalmazzák. A repülőgép-fedélzeti rakéták kis részét látják el környező levegőt felhasználó sugárhajtóművekkel.

A kétkomponensű folyékony hajtóanyagú (tüzelőanyag és oxidálószer) rakéta-hajtóművek alkalmazásának számtalan, bonyolultságot jelentő folyamata van (szerkezeti felépítés, mozgó alkatrészek, üzembe helyezés előtti ellenőrzés veszélyessége), ez akadályozza a folyékony hajtóanyagú repülőgép-fedélzeti rakétahajtóművek elterjedését. [7][8][9][10]

1.1. Gázturbinás hajtóművek

A repülőgép-fedélzeti rakétákon környező levegőt felhasználó gázturbinás sugárhajtóműveket meglehetősen ritkán alkalmaznak. A gázturbinás hajtómű szerkezete szintén bonyolult és ezért magas az előállításának költsége. Ezen hajtóművekkel elérhető sebesség kisebb hangsebességnél. Alkalmas területe a robotrepülőgép-

pek hatótávolságának növelése (800-2400 km), mivel a gázturbinás hajtómű működtetéséhez a tüzelőanyagot kell a fedélzeten elhelyezni, az oxigént a hajtómű a levegőből nyeri.

Ez utóbbi azt jelenti, hogy a hajtóanyagnak 70-80%-át szükségtelen a fedélzeten szállítani. Ilyen hajtóművel volt felszerelve az amerikai *Hound Dog* robotrepülőgép, melyet 15 km magasságból lehetett indítani a B-52-es bombázó-repülőgép fedélzetéről a 800-1000 km távolságban elhelyezkedő földi célpont ellen. [13]

1.2. Torlósugár-hajtóművek

Körkörös elhelyezett fúvókákon át táplálják be a tüzelőanyagot a levegőáramba, mely a keveredés és gyújtás után közel állandó nyomáson elég. Az égéstermék a fúvócsőben kiterjed, hőesése rovására sebessége megnő. A fúvócsővön át nagy sebességgel kiáramló gázok hozzák létre a repülőeszköz hajtására szolgáló tolóerőt. A torlósugár-hajtómű, mozgó alkatrész nélküli sugárhajtómű, amelyben a levegőt a nagy sebességgel áramló levegő lefékeződésekor ébredő torlónyomás sűriti a megfelelő értékre. A torlósugár-hajtómű a legegyszerűbb szerkezetű sugárhajtómű, nincs kompresszor, sem turbina elhelyezve benne. A szívócsatornába nagy sebességgel érkező levegőt a diffúzoros kialakítású beömlőnyílás sűriti és juttatja a levegőt a tüzelőtérbe.

A torlósugár-hajtómű megfelelő működéséhez hangsebességnél nagyobb(2-3 M) levegőáramlási sebesség szükséges. A torlósugár-hajtóművel rendelkező rakétákat szilárd hajtóanyagú startakéta gyorsítja fel hangsebességre. Ezt követően a torlósugár-hajtómű már gazdaságos működésre alkalmas. A torlósugár-hajtómű a többi környező levegőt felhasználó sugárhajtóműhöz hasonlóan azért gazdaságosabb a rakétahajtóműnél, mert a tüzelőanyag elégetéséhez szükséges oxigént a levegőből nyeri. A torlósugár-hajtómű legfontosabb jellemzőjét, fajlagos tolóerejét (fajlagos impulzusát) tekintve számottevően felülmúlja a szilárd hajtóanyagú rakétahajtóművet.

A sugárhajtóművek fajlagos tolóereje azt mutatja meg, hogy a hajtómű 1 kg hajtóanyag egy másodperc alatt történő elégetésekor, mekkora tolóerőt hoz létre.

A szilárd hajtóanyagú rakétahajtóművek fajlagos tolóereje általában 2500-3000 Ns/kg (légüres térben). A torlósugár-hajtóművek fajlagos tolóereje elérheti akár a 10 000-15 000 Ns/kg is.

Az első torlósugár-hajtóműves rakéták a honi csapatok harceszközei voltak. E rakéták törzsének külső részére helyezték el a gyorsító startrakétákat. Az angol légvédelem *Bloodhound* és *Thunderbird* légvédelmi rakétái ilyen elrendezésűek. Ezeket a rakétákat azonban a külsejükre felszerelt startrakéták a repülőgép fedélzeten való alkalmazásra alkalmatlanná tették.

A torlósugár-hajtóműves repülőgép-fedélzeti rakéták kialakításánál a fentiek miatt új szerkezeti elrendezést kellett eszközölni. A szilárd hajtóanyagú startrakétát a torlósugár-hajtómű tüzelő terében helyezték el, ezzel sikerült a rakéta kedvező méreteit fenntartani és tömegét pedig csökkenteni. Az ilyen új szerkezeti felépítésű rakétahajtóműveket torlósugaras-rakétahajtóműnek nevezték el.

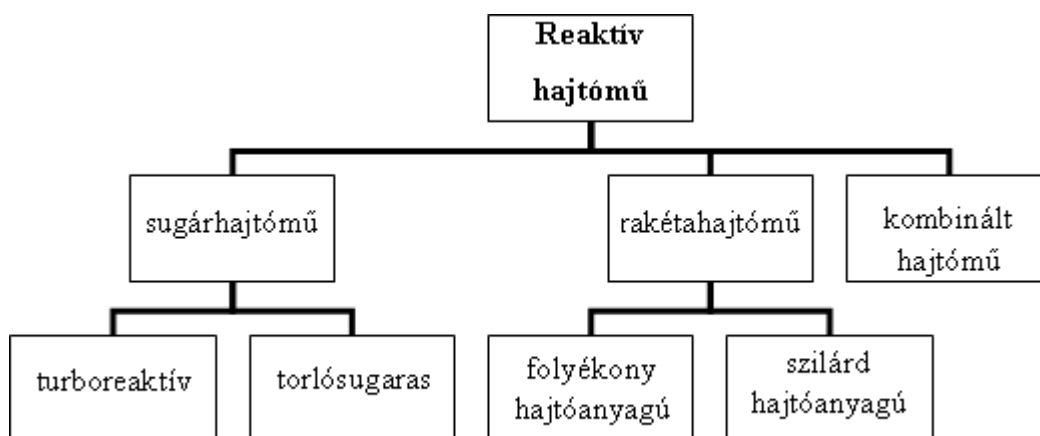
Számos kombinációban gyártanak torlósugaras-rakétahajtóműveket.(Folyékony tüzelőanyagú, szilárd tüzelőanyagú,gázgenerátoros, stb.) [13][14]

2. A RAKÉTAHAJTÓMŰVEK CSOPORTOSÍTÁSA

A hajtómű a rakéta egyik legfontosabb alapvető egysége. Szerepe a tolóerő létrehozása, amely biztosítja a rakéta leválását az indítóberendezésről, valamint az irányításhoz, és a cél elfogásához szükséges sebességet.

A hajtóművek szerkezeti kialakítása és működési elve sokoldalú. A kutatók az elméleti elképzeléseket igyekeztek gyakorlatban is megvalósítani több-kevesebb sikerrel, létrehozva ez által a napjainkban is alkalmazott legeredményesebbnek bizonyult hajtóműveket.

A rakétákban kizárólagosan reaktív hajtóműveket alkalmaznak, melyeket a következő módon csoportosítunk:



3. ábra A hajtóművek csoportosítása [15] [Néninger Attila–MSPaint]

A csoportban szereplő hajtóműveket még további kombinációkban is alkalmazzák az igényeknek megfelelően.

A továbbiakban fontos kitérni néhány törvényszerűségekre melyeket a rakétahajtás gyakorlatában figyelembe kell venni és a felmerülő feladatok során alkalmazni kell.

A rakétamozgás alapegyenletét az impulzustétel segítségével vezethetjük le. A tétel kimondja, hogy zárt rendszerben (melyben csak belső erők működnek) a mozgásmennyiség nem változik meg a belső erők hatására.

Érintőlegesen tárgyalni kell Newton törvényeit, különös tekintettel tehát a mozgásmennyiség, az impulzus, akció-reakció erőkkel kapcsolatos fogalmakat.

A rakéták mozgását a nagy sebességgel kiáramló gázok reakcióereje idézi elő.

Mint tudjuk a zárt rendszer mozgásmennyisége nem változik meg.

$$m_1 \cdot w_1 = m_2 \cdot v_2 \quad (1)$$

A hatás mozgásmennyisége egyenlő nagyságú de ellentétes irányú a visszahatásával. A nyomás a zárt rendszerben kiegyenlített marad. A tolóerő nagysága az

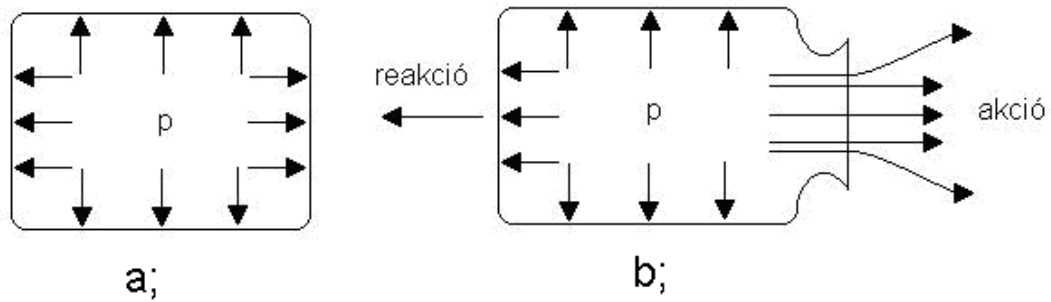
$$F_t = w \cdot \frac{dm}{dt} \quad (2)$$

képlet segítségével határozható meg, ami nem más mint a kiáramló gázok sebességének és az időegység alatt kitesztított tömegnek a szorzata.

A reaktív hatás a mindennapi életben is jól észrevehetően mutatkozik.

Ha a tóparton álló csónakból partra ugunk (hatás), a csónak el fog távolodni a parttól (ellenhatás).

A hatás-visszahatás elemzése érdekében vegyünk példának egy valamilyen hajtóanyaggal (pl.: lőporral) megtöltött minden oldalról lezárt edényt (4/a. ábra). A lőpor begyújtásával az edényben gáz képződik és nyomást fejt ki. (Zárt rendszerrel beszélünk, tehát a gáz minden irányba azonos nagyságú nyomást fejt ki.) A gáznyomás az edény ellentétes oldalaira kiegyenlítődik ezért az nyugalmi állapotban marad. Ha egy ugyanilyen edényt veszünk azzal a különbséggel, hogy a jobboldalán egy kis nyílás van (4/b. ábra), akkor az erősen sűrített gáz a nyíláson áramlik ki. Ekkor azonban a nyomást a baloldali falon nem fogja egyensúlyozni a jobboldali a felső és alsó falon viszont kiegyenlítődik. Értelmszerűen mivel a gáz az edény jobb oldalán távozik, a gáz kiáramlásával ellentétes irányba visszaható erő jön létre, vagyis az edény balra elmozdul.



4.ábra Hatás-ellenhatás szemléltetése [8] [Néninger Attila–MSPaint]

Régen elterjedt egy tévhit, mely szerint a rakéta azért mozog, mert a kiáramló gázok a talajtól vagy éppen a környező levegőtől ellökik. A fizikai elvek tisztázása után nyilvánvalóvá vált, hogy a rakéta mindig belső erők hatására jön mozgásba, magában a rakétában fellépő erők által mozgásba hozott test szempontjából közömbös, hogy a környezetében található-e levegő vagy sem.

Az egyes rakéták mind fizikai és mind kémiai szempontból függetlenek a levegőtől. A hajtóanyag elégetéséhez nincs szükség a környező levegő oxigénjére, mivel az oxigént vagy az adott hajtóanyag tartalmazza, vagy a rakéta külön tartályban szállítja magával. A rakéták ezen kettős tulajdonsága teszi lehetővé, hogy extrém magasságokban közlekedő eszközök (pl.: nagy hatótávolságú irányítható lövedékek és űrhajók) kizárólagos hajtóművei legyenek.

A hajtóműveket két csoport szerint vizsgálhatjuk a hajtóanyag felhasználása szempontjából. Az egyik csoport a hajtóanyag felhasználásához igényli a levegőt a másik csoport pedig nem.

Működéshez nem használnak fel levegőt:

- szilárd hajtóanyagú rakéták;
- folyékony hajtóanyagú rakéták;
- atomrakéták;
- elektromos (plazma, ion) rakéták.

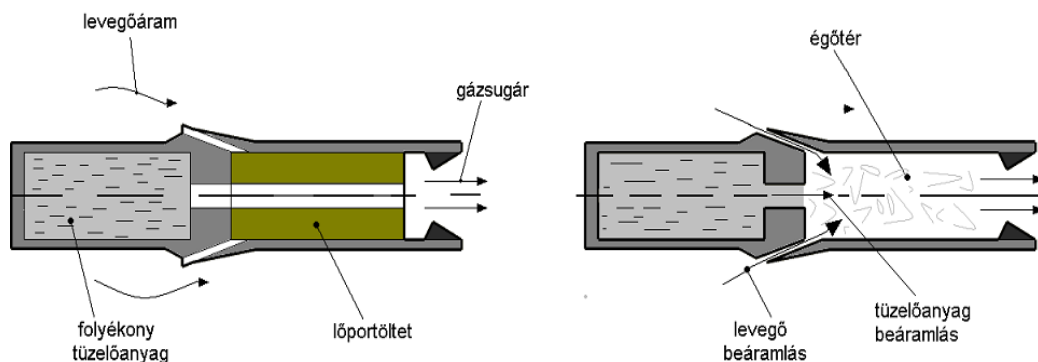
Működéshez levegőt használnak fel:

- dugattyús hajtóművek légsavarral;
- torlósugárhajtóművek;
- lüktető sugárhajtóművek;
- légsavaros-gázturbinás hajtóművek;
- turbósugárhajtóművek.

A **gázsugarhajtóművel** hajtott eszközök működési magassága korlátozott. A levegőt fel nem használó hajtóművek függetlenek a levegőtől, de hátrányuk viszont, hogy nagy mennyiségű hajtóanyagot fogyasztanak.

Viszonylag kis geometriai méretekkel rendelkezik a **turboreaktív** hajtómű. Általában robotrepülő és szárnyas rakéták hajtóműve. (utóbbit nem tekintjük rakétának a hagyományosan vett értelmezésben). Szerkezete és működési elve nagyban hasonlít a turbinás hajtóművéhez. Kis magasságokban kerül alkalmazásra.

A **torlósugaras** hajtómű előnye, hogy a rakéta csak a tüzelőanyagot hordozza magával, hiszen a levegőből nyeri a szükséges oxidálószeret. Ez viszont egy igen jelentős hátrányt is jelent egyben, ugyanis a rakéta csak léggel telt térben fog rendeltetésszerűen működni, illetve a folyamatos levegőáramláshoz tartania kell a $v > 1,5M$ arányt. A megfelelő sebesség biztosításához az égőtérben szilárd hajtóanyagot helyeznek el, ami segíti a rakéta megfelelő sebességének az elérését, majd a megfelelő sebességre való felgyorsulás után megtörténik a torlósugarhajtómű indítása.



5.ábra Kombinált torlósugaras hajtómű [16] [Néninger Attila Google sketchup]

A rakétahajtóműveket általában a levegőt nem nyelő (anaerob) hajtóművek közé soroljuk. Itt az energiaforrás és a kiáramló tömeg szerepét ugyanazon kémiai vegyületek összessége látja el.

Az általános esetben a kémiai vegyületeket alkalmazó rakétahajtóművek az alábbi alkotóelemekből állnak:

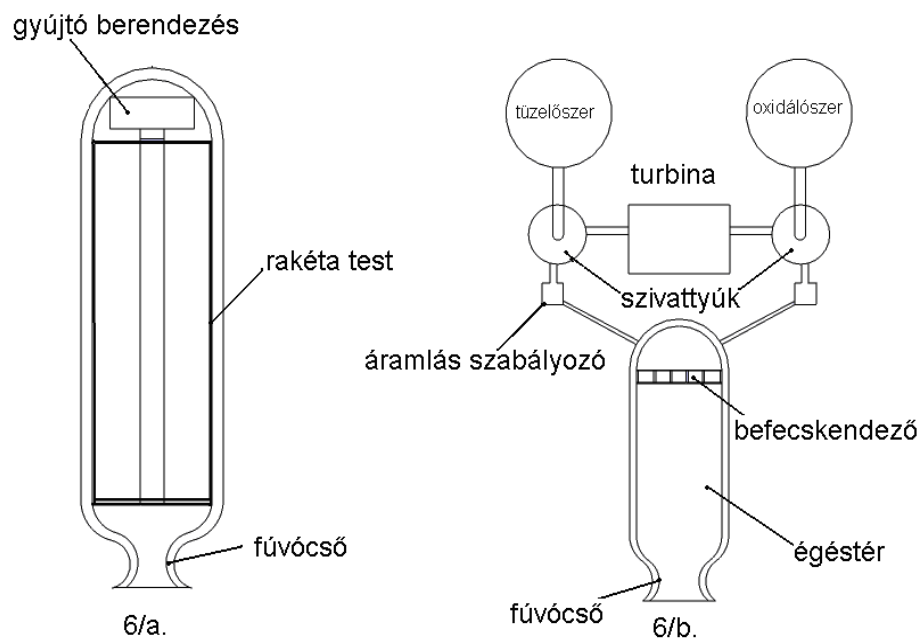
- egy vagy esetleg több **tartályból**, melyeknek feladata az üzemanyag hordozása illetve az üzemanyag komponenseinek szállítása;
- egy **égőkamrából** melyben a kémiai reakció zajlik, illetve itt keletkezik a magas hőfokú égéstermékek gázkeveréke;

- alkalmazásnak megfelelően egy vagy több **fúvócsóból**, ahol az égéstermékek expanziója következtében az adott gáztömeg a hangsebesség sokszorosára gyorsul és a kiáramlásával létrehozza a hajtómű hajtását segítő tolóerőt;
- esetenként egy **üzemanyag táplálórendszerből** az ergoloknak (üzemanyag komponens) az égőkamrába való befecskendezéséhez;
- egy **gyújtóberendezésből** amely megfelel a biztonságos üzemeltetés feltételeinek a hajtómű beindításához.

A rakétahajtóműveket hajtóanyaguk szempontjából két fő csoportra szokás felosztani:

- szilárd hajtóanyagú rakétahajtómű (**SzHRH**), egyes szakirodalmakban lőportöltetűnek is nevezik elterjedtsége miatt;
- folyékony hajtóanyagú rakétahajtómű (**FHRH**).

A 6/a. ill. a 6/b. ábra szemlélteti a két típus közötti lényegesebb szerkezeti eltéréseket. Láthatjuk, hogy az SzHRH szerkezeti kialakítása lényegesen egyszerűbb az FHRH felépítésénél.

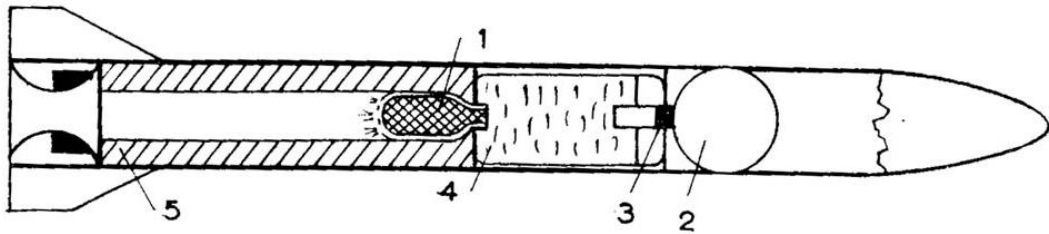


6. ábra SzHRH és FHRH szerkezeti eltérései [9] [Néninger Attila Google sketchup]

Számos irodalom említ még egy harmadik csoportot mely nem más mint a hibrid hajtóanyagú rakéták, melynek sajátosságát a két fő csoport részletes tárgyalása előtt felületesen érintek. [7][8][9]

2.1. Hibrid hajtóanyagú rakétahajtómű

A szilárd és a folyékony hajtóanyagú rakéták kedvező tulajdonságait a hibrid rakétahajtóművekben próbálják kombinálni.



7. ábra Hibrid rakétahajtómű [12]

- 1- gyújtó
- 2- kiszorító tartály nagy nyomású nitrogénnel
- 3- nyomáscsökkentő szelep
- 4- folyékony oxidálószer
- 5- szilárd tüzelőszer

Jellegzetes tulajdonsága ezeknek a rakétahajtóműveknek, hogy szilárd tüzelőanyagot égetnek el cseppfolyós oxidálóanyag hozzáadásával. Vannak három komponensű változatai is, például szilárd tüzelőanyag és szilárd oxidálóanyag keveréke, amelynek égését folyékony oxidálóanyaggal fokozzák vagy szilárd tüzelőanyag, amelyet a cseppfolyós tüzelőanyag és oxidálóanyag elegyével használnak fel. Ezen háromkomponensű szerkezeteket tribrid rakétáknak is szokás nevezni. Előfordulhat az egyik, vagy mindkét összetevő kocsonyásított állapotban is. A hibrid rakétahajtóművekben a hajtóanyag cseppfolyós összetevőjét – mint ahogy a dolgozatban tárgyalt folyékony hajtóanyagú szerkezetekhez hasonlóan – sűrített gáz nyomásával vagy szivattyúszerkezetek segítségével juttatják a tüzelőtérbe. Adott egy másik megoldás, melynél a tüzelőtérbe csövet helyeznek és az ebben képződő gőzök segítik nyomásukkal a cseppfolyós anyag szállítását. Az adagolás szabályozásával lehetőség nyílik a tolóerő nagyságának változtatására. Az oxidálóanyagok között a cseppfolyós oxigént a vörösen füstölgő salétromsavat, a nitrogén-tetroxidot említhetjük. Különböző műanyagok: az alumínium, a magnézium és a lítium valamint ezek hibridjei alkalmasak szilárd tüzelőanyagoknak. A polietilént cseppfolyós oxigén-

nel elégetve majd 3000 m/s ideális kiáramlási sebesség érhető el, a fém lithiumnak a salétromsavval való reakciója során pedig 3400 m/s.

Üzembe helyezhetőségi és rakéta mozgékonyági szempontból a szilárd hajtóanyagú rakétahajtóművekhez hasonlíthatók a hibrid hajtóművek, bár gázkiáramlási sebességben jobb eredményekkel maga mögé utasítja az egyszerű szerkezetű SzHRH-t.

Főképpen starttrakétáknál alkalmaznak hibrid összetételt, de előfordulnak kisebb irányítható rakétafegyverek körében is [9][12][14]

3. A RAKÉTAHAJTÓMŰVEK FELÉPÍTÉSE, MŰKÖDÉSE

A rakétákban felhasznált legelterjedtebb hajtómű az SZHRH. Dolgozatomban ennek a típusnak a segítségével fogom kielemezni a hajtómű működését, felépítését.

3.1 Szilárd hajtóanyagú rakétahajtómű

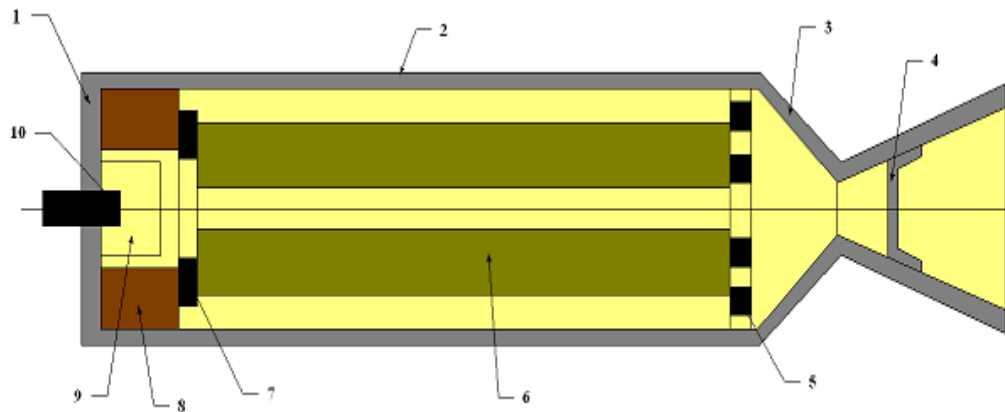
Az SZHRH szerkezeti felépítése a többi rakétahajtóműhöz képest igen egyszerű, lényegében fűvócsővel ellátott, hajtóanyaggal töltött tér. A hajtótöltet elhelyezésére szolgáló tér azonos a tüzelőtérrel, tehát a töltet tere az elégés folyamán tüzelőtérre változik.

Működését nem bonyolítják különböző mozgó alkatrészek (pl.: szelepek, szivattyúk és szabályozó berendezések), melyek meghibásodása hosszas vizsgálódáshoz vezethet. A rakéta állandó harckésztségben van, hiszen nem igényel függesztés előtt hosszas biztonsági ellenőrzéseket és tárolása sem követel magas biztonsági szintet más típusokhoz képest. A szilárd hajtóanyagotöltet olyan egynemű anyag melynek minden részecskéjében megtalálható az oxidálószer és az üzemanyag. A szilárd hajtóanyagú rakétákban az égési folyamat nagyon gyorsan zajlik le: pár tized másodperctől mintegy 50 másodpercig terjedő időintervallumban. A szilárd hajtóanyag adott formájától és az égésfelület törvényszerűségeitől függ az időegységként létrejövő illetve kiáramló gázmennyiség, ismert nevén a tolóerő.

Az SzHRH szállítása körülményes. A benne lévő hajtóanyag rázkódás során könnyen töredezhethet, ez a későbbiekben akadályozhatja a szerkezet rendeltetésszerű működését. Az SzHRH hátrányaként szokták említeni még, hogy a tolóerő szabályozása meglehetősen körülményes. Kis nyomáson a hajtóanyag égése gyakran instabil, befolyásolja az égés sebességét a külső hőmérséklet. Ezt a hajtóművet csak egyszer lehet beindítani, leállás esetén nincs lehetőség újraindításra. A szilárd hajtóanyaggal rendelkező szerkezeteket különböző hatótávolságú feladatokra használják. A startrakéták körében is elterjedtek.

A szilárd hajtóanyagú rakéták a folyékony hajtóanyagúakkal szemben több területen is teret hódítottak, mióta a fent említett tolóerő szabályozására megfelelő módot találtak. A szilárd hajtóanyagú rakéták tolóerejét a tüzelőtérben uralkodó nyomás változtatása révén lehet módosítani. A másik módszer, hogy a távozó égéstermékek egy részét a fűvócső megkerülésével kell elvezetni szelepek segít-

ségével. A tüzelőtér nyomását hanggenerátorból bevezetett akusztikus hullámok segítségével lehet szabályozni.



8. ábra SzHRH szerkezeti felépítése [16] [Néninger Attila Google sketchup]

- 1- mellső fedél
- 2- hajtóműtest
- 3- hátsó fedél a fúvókával
- 4- zárófedél
- 5- rács
- 6- hajtómű töltet
- 7- közbetét
- 8- amortizátor
- 9- gyullasztótöltet
- 10- piropatron

Az égőtér a mellső- és hátsó fedél hozza létre. Szerkezetük 1-2 illetve 3mm falvastagságú acéllemezből készül hegesztett kötéssel csak úgy mint a hajtóműtest is. A falvastagságot az égőtérben uralkodó nyomás határozza meg. A tömeg csökkentése érdekében gyakran alkalmaznak könnyűfém ötvözeteket. Ebben az esetben a hőszilárdság problémája jobban érvényesül. A hajtómű működése során a túlmelegedés elkerülése érdekében 0,5-1,5mm vastagságú hőszigetelő réteggel vonják be a belső felületet.(porlasztással viszik fel az előre felmelegített felületre).

A lőportöltetben esetleg radiális furatok lehetnek, melyek az égőtér nyomásának egyenletes eloszlását szabályozzák. A nem kívánatos rezgések csökkentése érdekében a lőportöltet közbetét segítségével az amortizátorra (gumihenger) támaszkodik.

A rács vagy más nevén a diafragma a lőportöltet másik támaszául szolgál. Feladata, hogy megakadályozza a lőportöltet el nem égett nagyobb darabjainak a fűvócsőbe kerülését ami a hajtómű felrobbanásához vezethet.

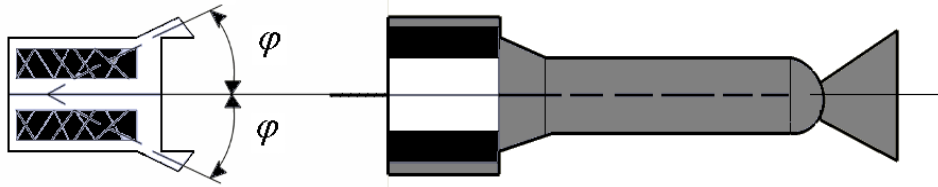
A fűvóka sajtolásos eljárással illeszkedik a hajtómű hátsó fedeléhez. Különös figyelmet kell fordítani arra, hogy hossz tengelyének a meghosszabbítása a rakéta tömegközéppontjában legyen. (hibás szerkezet következménye NIR esetén jelentős szórás, IR esetén pedig nem kívánt forgás jöhet létre. Nagy töltettel szerelt hajtómű esetén a megfelelő működés érdekében úgynevezett fűvóka blokkot alkalmaznak, mely 3-5 vagy akár 7 fűvóka együttesét képezi. Áramlástan szempontból igen lényeges a fűvókanyílás szögének helyes megválasztása. Gyakorlati értéke általában 24-36°-ig terjed. A fűvóka belső felületét fényesre kell polírozni. A sima felület hozzájárul a gázáram akadálytalan terjedéséhez, mozgásához csökkentve ezzel a súrlódási- és hővesztési tényezőket. A fűvócső konstrukcióját pontos számítások alapján kell elvégezni, különös tekintettel a fűvócső nyakánál lévő legömbölyítésekre. Hibás kialakítás esetén megtörténhet a gáz sugar leválása.

Nagy ellenállóképességgel kell rendelkezni a kritikus keresztmetszetnek, amely rendkívül nagy igénybevételnek van kitéve. Az eróziós folyamat során ez a keresztmetszet a hajtómű égése alatt tágulna, ezt kiküszöbölve bizonyos szakaszon állandó keresztmetszetű grafitbélést rögzítenek.

A fűvókákat különböző formákban lehet a hajtómű szerkezetén elhelyezni. Abban az esetben, ha a hajtómű nem a rakéta utolsó elemeként szerepel, akkor legalább két szimmetrikusan elhelyezett fűvócsövet kell alkalmazni, melyek a rakéta hossz tengelyével φ szöget zárnak be és a tolóerő vektorok lehetőleg a rakéta tömegközéppontján haladjanak keresztül. Ebben az esetben a hatásos tolóerő csökken.

$$F_t = 2 \cdot F_1 \cdot \cos\varphi \quad (3)$$

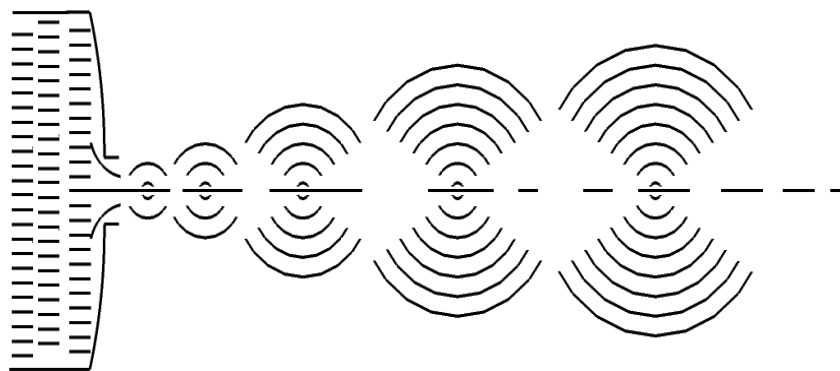
F_1 -az egyik fűvóka által létrehozott tolóerő



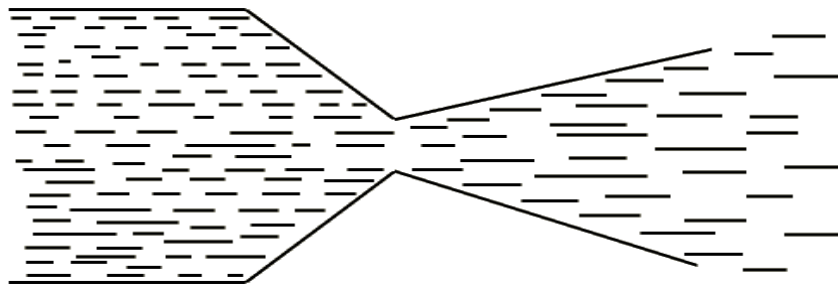
9. ábra A hajtómű fűvókáinak lehetséges elhelyezése [16] [Néninger Attila Google sketchup]

A hajtóművek gazdaságos működtetéséhez a gázok áramlását szabályozni kell. Ezt úgy oldják meg, hogy a gázokat a hajtómű bizonyos szakaszán szűkülő keresztmetszetben áramoltatják. Ekkor a gázok nyomása mozgási energiává alakul át. Amikor a gázcsepp sebessége azonos lesz a helyi hangsebességgel, ott lesz az úgynevezett kritikus keresztmetszet (a fűvóka legkeskenyebb része). A szűk „csatorna” után a fűvókának ismét tágulnia kell, amíg a gázok nyomása a külső nyomással lesz egyenlő. Közben a gázcsepp torkolati sebessége a hangsebesség sokszorososa lesz.

Az ilyen típusú kivitelezéseket hangsebesség feletti fűvócsőnek, más néven Laval-fűvókának nevezik.

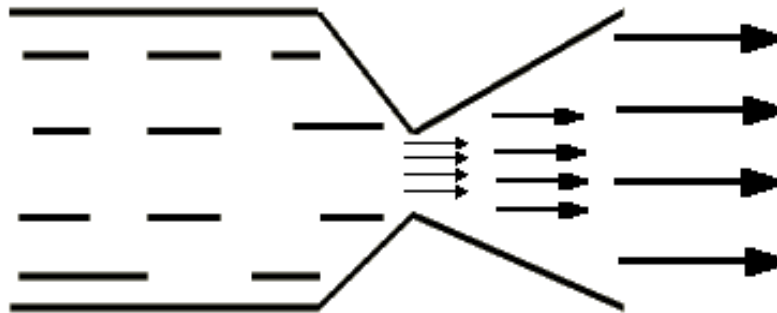


10. ábra Szűkülő fűvókából kilépő gázsugár [16] [Néninger Attila Google sketchup]



11. ábra Laval-fűvókából kilépő gázsugár [16] [Néninger Attila Google sketchup]

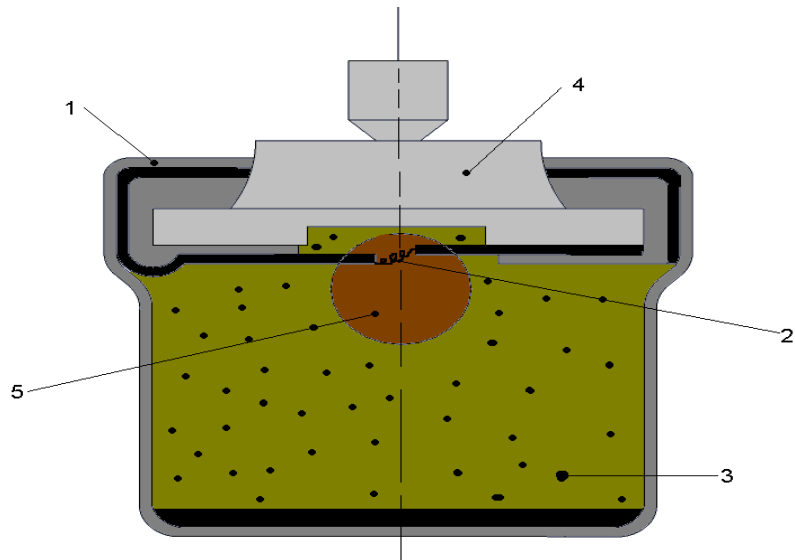
A fúvókát Gustaf de Laval svéd feltaláló fejlesztett ki a XIX. században. A gázok eltérően viselkednek szubszonikus és szuperszonikus sebességeken, ez adja a fúvóka működésének alapjait. A gáz sebessége szubszonikus áramlás esetén növekszik abban az esetben, ha a cső szűkül, hiszen az áramló mennyiség (kg/s) állandó. Ebben az esetben a gáz úgy viselkedik, mint az összenyomhatatlan folyadékok. A kritikus keresztmetszetben a gázsebesség transzszonikus lesz. Amint növekedik a fúvóka keresztmetszete a gáz expanziója, sebessége szuperszonikus lesz. Ekkor nem képesek visszafelé haladni a hanghullámok, mivel a gáz sebessége nagyobb a hangénál. Az expanzió felgyorsítja a gáz fúvókából történő kiáramlását, amely a tolóerő növekedését eredményezi. [17]



12. ábra Nyomás átalakulása sebességgé Laval-fúvókában [16]
[Néninger Attila Google sketchup]

3.1.1. Piropatron működése

Az SzHRH indítása piropatronnal történik. Az indításkor elektromos feszültséget kapcsolunk a piropatronra, amely az izzószál felhevülése során felrobban és indítja a durva szemcsés fekete lőporból álló gyullasztó töltetet. A lehetséges meghibásodás elkerülése érdekében gyakran alkalmaznak két, egyidejű működtetésű piropatron. A piropatron szerkezete 13. ábrán látható:



13. ábra Piropatron szerkezete [2] [Néninger Attila Google sketchup]

- 1- fémház
- 2- izzógyújtó
- 3- gyullasztótöltet
- 4- érintkező tűske
- 5- tricinát robbanótöltet

A fémházban az elektromos csappantyúval egyező módon nyer elhelyezést az izzógyújtó. Az izzógyújtó alatt található a gyullasztótöltet. A megfelelő működés céljából a piropatron egy speciálisan elkészített piropisztolyba kell elhelyezni. Működését a piropisztoly érintkező tűske útján közvetített pozitív áramimpulzus váltja ki, mely a két lapka közötti izzógyújtó fémszálon áthaladva felrobbantja a hőre nagyon érzékeny úgynevezett tricinát (trinitro-rezorcinát) robbanótöltetet, ami begyújtja a fekete lőpor gyullasztótöltét. A létrejövő nagy hőmérsékletű és nyomású gázok kitöltik az égőteret és megtörténik a hajtómű töltetének a begyújtása.[2][4]

3.1.2. A tolóerő meghatározása

A hajtómű feladata, hogy a rakétát nagy sebességgel gyorsítsa legyőzve a különböző ráható erőket (levegő ellenállása, nehézségi erő), melyek a mozgásban akadályozzák. A reaktív erők összességéből adódik a rakétahajtómű teljes tolóereje. Az első összetevőt a fúvócsőből kiáramló gázok sebessége és mennyisége határozza

meg, a másikat pedig a kiáramlási keresztmetszet nagysága, a kilépő gázok és a környező közeg statikus nyomáskülönbsége fogja behatárolni.

$$F_t = m_f \cdot v_4 + F_4 \cdot (p_4 - p_H) \quad (4)$$

ahol:

- F_4 – a fúvócső kiáramlási keresztmetszete
- p_4 – a gázok nyomása a kiáramlási keresztmetszetben
- p_H – a környező közeg nyomása a hajtómű működésének a magasságában
- v_4 – a gázok sebessége a kiáramlási keresztmetszetben

V_4 részletesebb vizsgálata szükséges. A kiáramló gázok sebessége befolyásolja a tolóerő nagyságát. Nagyobb kiáramlási sebesség nagyobb tolóerőt fog létrehozni.

$$V_4 = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot k}{k - 1} \cdot R \cdot T \cdot \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_2^*} \right)^{\frac{k - 1}{k}} \right]} \quad (5)$$

R és T illetve k értéke adott töltetre állandó lesz.

A gázok sebessége a kiáramlási keresztmetszetben a következő módon növelhető:

- p_2^* növelése, ami az égőtér falvastagságának növeléséhez vezet
- p_4 csökkentése F_4 növelésével érhető el. Ez bizonyos fizikai határokat szab meg. Gyakorlati értéke: $F_4 = (4 \dots 6) F_{kr}$.
- φ veszteségi tényező növelésével, melynek elvi maximális értéke 1.

A tolóerő teljességgel meghatározó összefüggést figyelembe véve m_f és v_4 értékét átalakítás után visszahelyettesítve a következő, egyszerű képletet kapjuk:

$$F_t = C_f \cdot F_{kr} \cdot p_2^* \quad (6)$$

ahol:

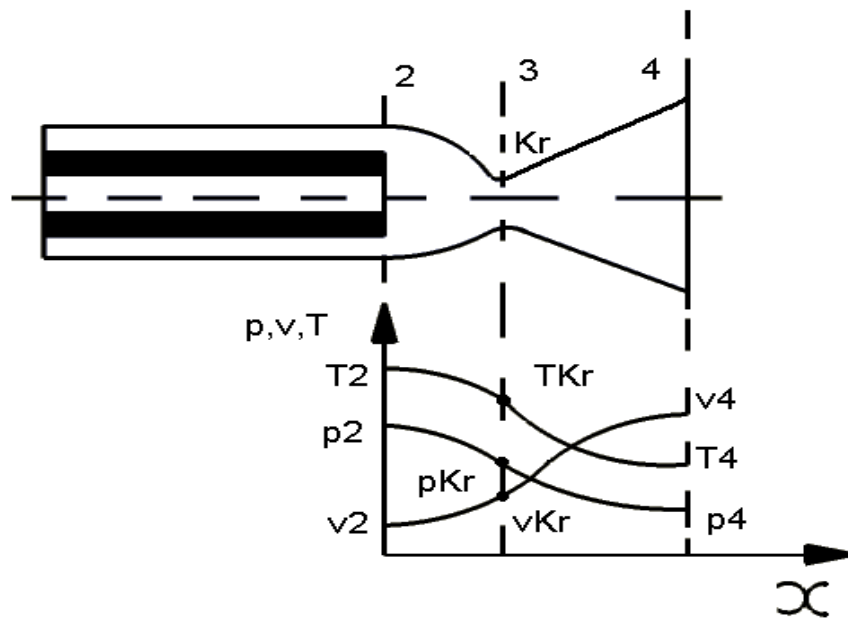
- C_f – tolóerő tényező

C_f meghatározása a következő módon történik:

$$C_f = \varphi \sqrt{\frac{2 \cdot k^2}{k-1} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot \left[1 - \left(\frac{p_4}{p_2^*}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} + \frac{F_4}{F_{kr}} \cdot \left(\frac{p_4}{p_2^*} - \frac{p_H}{p_2^*}\right) \quad (7)$$

A tolóerő tényező megmutatja, hogy a tolóerő hányszorosa az $F_{kr} \cdot p_2^*$ értéknek, amely esetben a keletkezett gázok speciális fúvóka nélkül távoznak a hajtóműből. Általános értéke: 1,6...1,7.

A 14. ábrán látható a fúvócső hosszának függvényében az áramló gázok nyomása, sebessége illetve hőmérséklete.



14. ábra Változási törvények a fúvócsőben [16] [Néninger Attila Google sketchup]

A kritikus keresztmetszetet a 3. metszetben láthatjuk.

$P_H=0$ esetében érhető el a legnagyobb tolóerő. A hajtómű magassági alkalmazása nem befolyásolja jelentős mértékben az összipulzust és a tolóerő nagyságát.

A fajlagos tolóerő a hajtómű működését jellemző tényező:

$$Ft_f = \frac{F_t}{m_f} ; \left[\frac{N \cdot s}{kg} \right] \quad (8)$$

Fajlagos impulzus számítható:

$$I_f = \frac{I_\Sigma}{m_t}; \left[\frac{N \cdot s}{kg} \right] \quad (9)$$

Ez azt az impulzust határozza meg, amelyet 1 kg töltet elégetésével nyerhetünk. A két összefüggés hasonlóságára a mértékegységük azonosságában is felismerhető, egyszerű bizonyítással pedig igazolható is.

A tolóerőt a t_a hajtómű működési ideje alatt helyettesíthetjük egy állandó, közepes értékével F_t . Ekkor a hajtóműre vonatkozó összimpulzus:

$$I_\Sigma = F_t \cdot t_a \quad (10)$$

A másodpercenkénti tömegváltozás pedig a következő lesz:

$$m_f = \frac{m_t}{t_a} \quad (11)$$

ahol:

- m_t - a hajtómű töltetének tömege

Figyelembe véve a $I_\Sigma = F_t \cdot t_a$ összefüggést, behelyettesítés után kapjuk:

$$I_f = \frac{F_t \cdot t_a}{m_t} = \frac{F_t}{\frac{m_t}{t_a}} = \frac{F_t}{m_f} = Ft_f \quad (12)$$

A hasonlóságra vonatkozó állítás tehát könnyen igazolható. A fajlagos impulzus igen fontos adat. Értékét általános eljárással kialakított hajtóművekre illetve a bennük uralkodó nyomásra adják meg, majd később pontosítják. Kolloid töltetekre jellemző nagysága 1600...2000. Az adott típus kiválasztását követően a legnagyobb mértékben az égőtér nyomása fogja befolyásolni.[2][16]

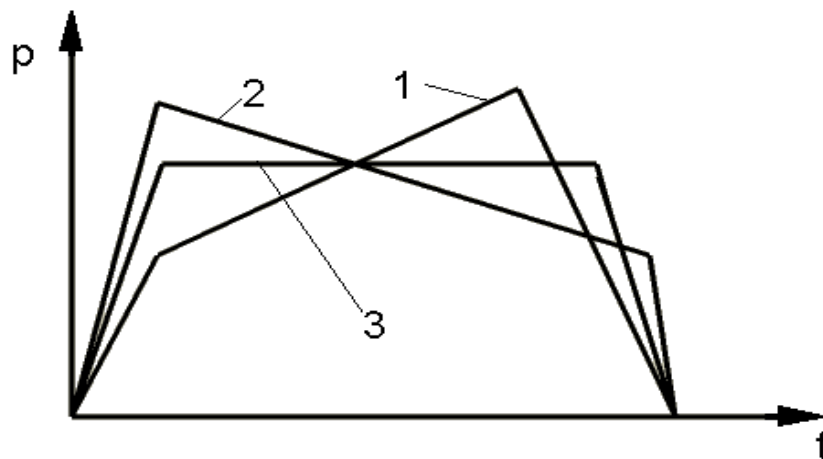
3.1.3. A töltet égése és hajtóanyag formák

Meggyújtás után (a rendeltetés függvényében) a szilárd hajtóanyag folyamatosan hosszabb ideig vagy csak néhány tizedmásodpercig ég. Az állandó nyomáson egy időegység alatt keletkező gázok mennyiségét a töltet égésfelületének nagysága határozza meg. Formától függően a töltet égésfelülete csökkenhet illetve növekedhet. Abban az esetben, ha az égésfelület növekszik akkor növekszik az időegység alatt keletkező gázok mennyisége. A töltet ilyen égését progresszívnek (1) nevezzük. Az égésfelület csökkenésével csökken az időegység alatt kiáramló gázok mennyisége. Ezt a fajta égést degresszív (2) égésnek nevezzük. A felület égés során történő változatlanságát semleges (3) égésnek nevezzük. A folyamatokat a 15. ábrán követhetjük nyomon.

Ha a töltet égési ideje mindhárom esetben t_a , a hajtómű tolóerejének összimpulzusa :

$$I_{\Sigma} = \Sigma I = \int_0^{t_a} p(t) \cdot dt \quad (13)$$

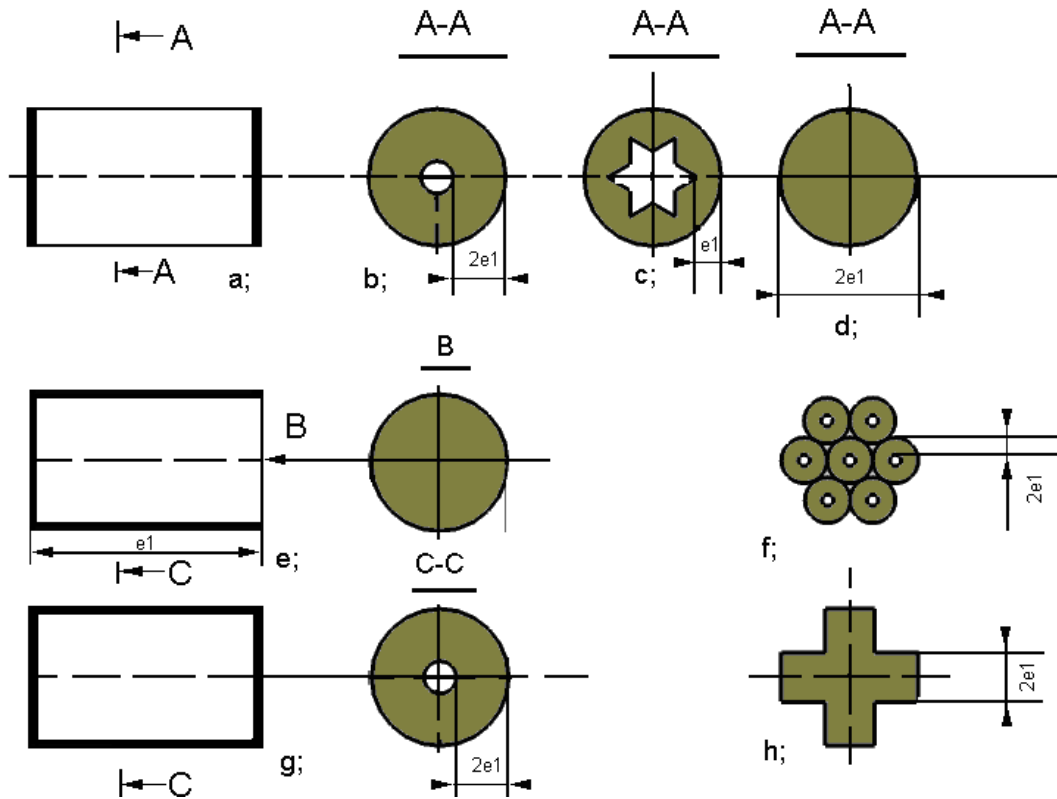
- $p(t)$ - az égőtérben uralkodó nyomás



15. ábra Felület változás az égés során [16] [Néninger Attila Google sketchup]

Az ábrán látható, hogy semleges égés esetén lesz a legkisebb a gázok maximális nyomása., ami az égőtér falvastagságának csökkentését teszi lehetővé. Az égés jellege a töltet formájával befolyásolható. Fontos paraméter az égő réteg vastagsá-

ga is (e_1), amely a hajtómű működési idejének meghatározásához kiinduló adatként szolgál. A töltet formáján kívül az égés befolyásolható az adott felületek hőszigetelő réteggel való bevonásával is.



16. ábra Égés formák és típusok [16] [Néninger Attila Google sketchup]

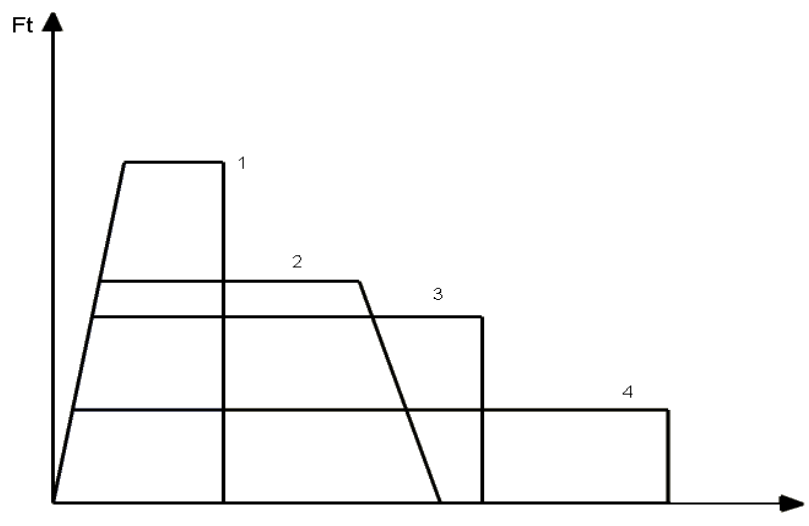
Az 16. ábrán látható égés formák típusai:

- d, h - degresszív égés
- g - progresszív égés
- a, b, c, e, f - semleges égés

A legelterjedtebb forma a csöves töltet (a ; b) amely egy hengeres test körkeresztmetszetű csatornával ellátva. Hőálló réteg borítja a töltet homloklapjait. Az égés sebessége a külső és belső homloklapokon megegyezik, az azonos mértékben csökkenő és növekvő felületek összege nem változik. Ez igaz az 16. ábrán látható „f”csöves kötegelt töltetre. NIR levegő-föld rakétákban használatos, ahol rövid idő alatt elég nagy tolóerőt lehet kifejteni, ami a találati valószínűség javítását eredményezi, mivel a repülési idő csökken.

Az 16. ábrán látható csillag keresztmetszetű belső csatornával rendelkező töltet csak belső felületen ég. Hőálló réteg védi a két homlokfelületet. A külső, úgynevezett palástfelület az öntési eljárás során rés nélkül érintkezik az égőtér falával. A csillagkeresztmetszet forma biztosítja az égési felület állandóságát az el réteg elégése során. Csaknem a teljes hajtómű működési ideje alatt nem jut forró égéstermék az égőtér falához, ez pedig lehetőséget ad a könnyű alumíniumötvözetből való kialakításra is. A „b” és „d” formájú töltetek sajátossága, hogy rést kell biztosítani az égőtér belső felülete és a hajtóanyag-töltet között. Ez a rés lesz az útja a töltet külső felületének égésekor keletkező gázoknak a fúvócsőbe. Fontos, hogy ezen töltettel rendelkező hajtóműveknél az égőtér falát acélból kell készíteni, és hőálló réteggel bevonni.

Az 16. „e” ábra homlokfelületen égő töltet kis égési felülettel és nagy vastagsággal bír. Merev hajtóművekben alkalmazzák, kis tolóerővel rendelkeznek, de ez hosszú ideig biztosítható.



17. ábra Tolóerő diagram [16] [Néninger Attila Google sketchup]

Az 17. ábrán különböző formájú hajtóanyag-töltetek diagramjai láthatóak, melyek azonos összipulzussal rendelkeznek.

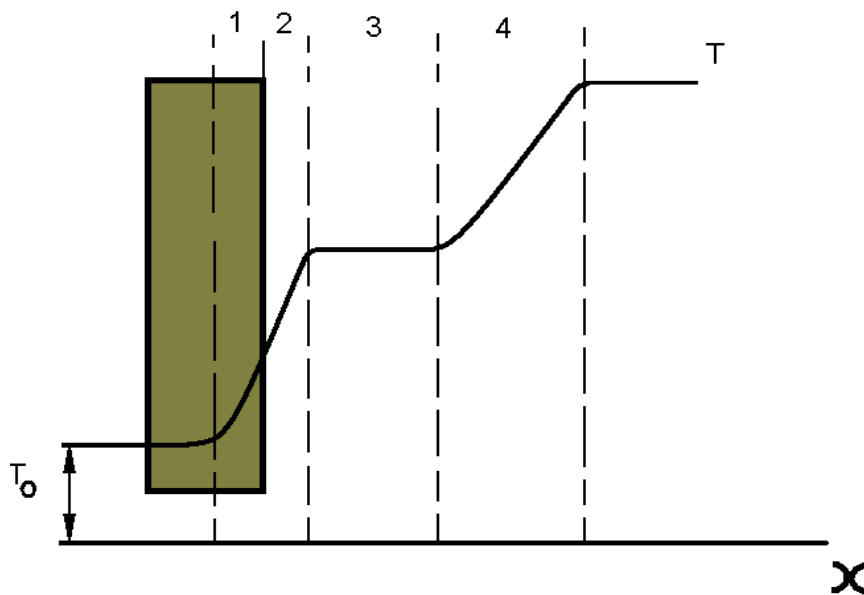
- 1- Csöves kötegelt töltet
- 2- Csillag keresztmetszetű, belső csatornával ellátott töltet
- 3- Csöves töltet
- 4- Homlokfelületen égő töltet. [7][9][16]

3.1.4. Szilárd hajtóanyag égésének folyamata

Az égés folyamata két fázisban tárgyalható, azzal a feltételezéssel, hogy az égési folyamat a geometriai égési törvényeknek megfelelően zajlik le, tehát az égés párhuzamos rétegekben megy végbe.

1. fázis: a töltet begyűjtása
2. fázis: maga az égés folyamata.

Az első folyamatot általában fekete lőporkorong elégése indítja. A létrejövő nagy nyomás (4,5-6 MPa) és a kialakult hőmérséklet hatására a lőportöltet felszíne fel fog melegedni, majd meggyullad. Ezzel kezdetét veszi a stabil égés. A stabilitás ebben az esetben azt jelenti, hogy az égés önfenntartóvá vált és egyenletes sebességgel terjed.



18. ábra Az égési folyamat [16] [Néninger Attila Google sketchup]

1. melegedési zóna
2. gázképződés zónája
3. égés-előkészítés zónája
4. lángolási zóna

Mint tudjuk, a szilárd hajtóanyagoknak nagyon rossz a hővezető tulajdonsága, ezért a töltet égése során szinte teljes mértékben megőrzi eredeti T_0 hőmérsékletét a teljes égés során, leszámítva a töltet legfelső, vékony rétegét (0,05-0,15 mm).

A második zóna szélessége az előzőnél is kisebb, viszont erősen függ a nyomástól. Itt halmazállapot-változás megy végbe, gyakran a folyékony fázis kiküszöbölésével. A hőmérséklet folyamatosan növekszik.

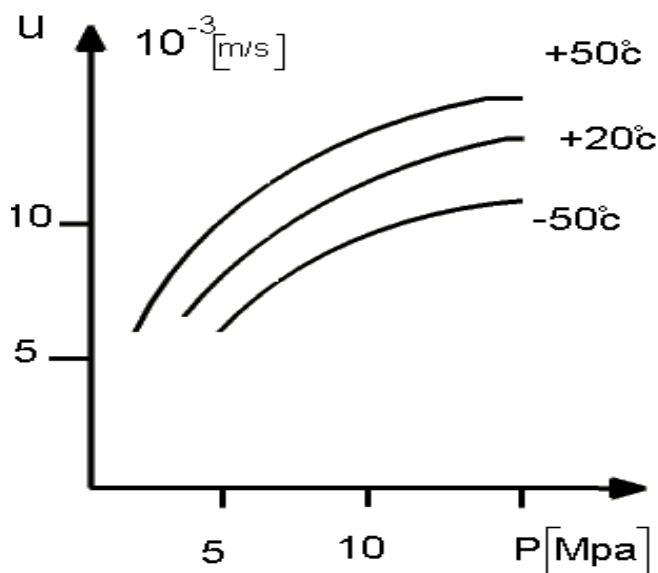
A harmadik zónában egyesül a hajtóanyag és az oxidálószer. Létrejön az égés. Ez a kémiai átalakulás nagy hőképződéssel jár.

A folyamat egésze jelentős mértékben nyomásfüggő. A nyomás csökkentése a zónák széthúzóását eredményezi. Egy bizonyos p_{\min} kritikus érték alatt történő égés az égés megszűnését eredményezheti (a hajtómű leállhat).

Az égés intenzitása, a gázképződés sebessége, azaz a szilárd hajtóanyag felbomlása nem más, mint az égési sebesség. A nyomás emelkedésével a magas hőmérsékletű zóna közeledik a töltet felszínéhez, növekedni fog a keletkező gázok mennyisége, koncentrációja. A kémiai aktivitás jelentősen nagyobb lesz. Ezek a tényezők együttesen az égési sebesség növekedéséhez járulnak hozzá.

A második legjelentősebb külső faktor az égés előtti hőmérséklet (kezdeti hőmérséklet). A töltet felhasználása előtti hőmérsékletet jelenti 24 órára visszamenőleg. A kezdeti hőmérséklet növekedése esetén csökken az idő, amit a gázképződési hőmérséklet elérésére kell fordítani, ez szintén az égési sebesség növekedését eredményezi.

A 19. ábrán különböző kezdeti hőmérsékletek mellett mutatják be az égési sebességet a nyomás függvényében.



19. ábra Töltet égési sebessége [16] [Néninger Attila Google sketchup]

Kísérletek útján a következő összefüggéshez juthatunk:

$$U = b \cdot p^n \quad (14)$$

ahol :

- u- égési sebesség;
- p- nyomás az égés felszínén;
- n- a töltet anyagától függő égési kitevő;
- b- a töltet kezdeti hőmérsékletétől függő tényező.

„b” értékét a következő közelítő eljárással számoljuk:

$$b = b_0 e^{q(t-t_e)} \quad (15)$$

ahol:

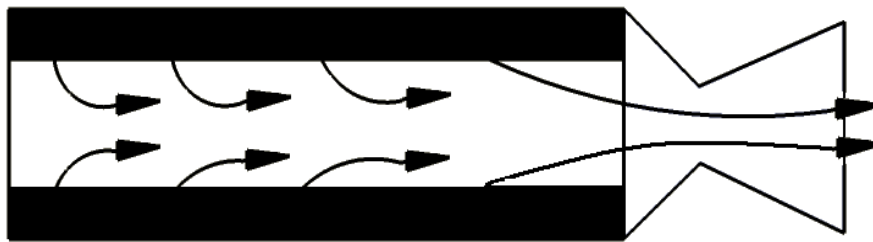
- b_0 - b értéke etalon hőmérsékleten ($t_e=15\text{ °C}$);
- q - a töltet anyagától függő hőmérsékleti tényező;
- t - a töltet kezdeti hőmérséklete.

Egyes paraméterek számértékének általános értékei:

Paraméter	Kolloid hajtóanyagok	Keverék hajtóanyagok
B_0	0,03...0,09	0,1...0,3
n	0,69...0,78	0,1...0,7
q	0,0037...0,0049	0,0013...0,0020

Általában az égés felszíne mentén létrejövő áramlás turbulens folyamatokat okoz, ez a hőátadás fokozását eredményezi. Az áramló gázok sebessége a fúvócső irányába növekszik (0-200 m/s), ami a töltet égési sebességének növekedését vonja maga után. Itt a töltet egyenetlenül ég. Ezt eróziós folyamatnak, eróziós égésnek nevezik.

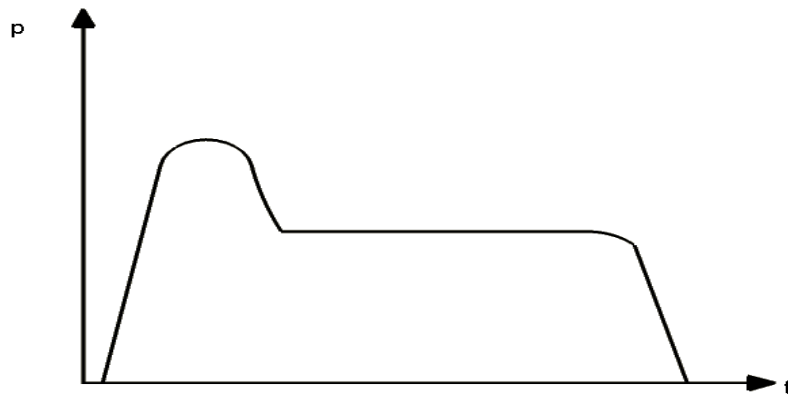
Az eróziós folyamat káros jelenségei közé tartozik az előre számítottól eltérően növekedő tolóerő. Az égési sebesség számításánál figyelembe vehető egy $k_c=1,1-1,3$ szorzótényezővel.



20. ábra Gázok áramlása [16] [Néninger Attila Google sketchup]

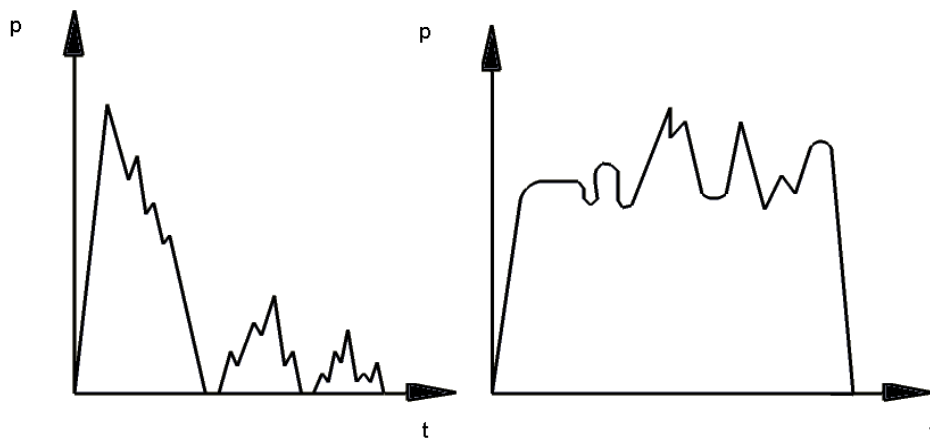
A hajtómű begyűjtésénél a nyomás néhány ezred másodperc alatt a környezeti nyomáshoz közeli értékről a maximális üzemi nyomást megközelítő értékre ugrik fel. Ez a nyomás először a propergoltömb (propergol = szilárd üzemanyag) belsejére hat, amely az égőkamra szerepét tölti be. A propergol, összenyomhatatlan közeg lévén a nyomást a tartályszerkezetnek adja át. A tartály térfogata megnövekszik. A propergoltömb a tartályban van, így azzal együtt deformálódik. Különböző méretezési hibák esetén az eróziós folyamat fokozatosan jelentkezik az égés kezdetén. Ez akkor fordulhat elő, ha az égési csatornákat túl szűkre tervezték. Ez az eset agresszív nyomásugrásokhoz vezethet, ami esetlegesen a hajtómű felrobbanását idézheti elő.

Mind a tolóerő nem számított változása, mind az agresszív nyomásugrás lehetőségének a valószínűsége csökkenthető a gázok áramlási sebességének csökkentésével, ez megvalósítható a hajtómű kitöltési tényezőjének csökkentésével. Változtatlan átmérő, illetve töltetanyag mellett ez a hajtómű méretezésének, hosszának növelésével valósítható meg, ami azonban káros tömegnövekedést okoz, illetve ismét a gázok áramlási sebességének növekedéséhez vezet.



21. ábra Nyomás a hajtóműben [16] [Néninger Attila Google sketchup]

A káros folyamatok közé sorolják a rezonáns égést is. Itt pulzáló égésről van szó, amely szintén a hajtómű üzemzavarát, lefulladását illetve robbanását eredményezheti.



22. ábra Labilis égési folyamatok [16] [Néninger Attila Google sketchup]

A labilis égési folyamatokat az alábbi feltételek betartásával lehet megakadályozni:

- a töltet megfelelően nagy kezdeti hőmérsékletének biztosításával;
- a töltet alkotórészeinek egyenletes eloszlásával;
- olyan töltet felhasználásával, amelyre p_{\min} érték kicsi;
- az égőtér megfelelő kialakításával, hullámtörők alkalmazásával;
- a töltetben radiális furatok készítésével. [16]

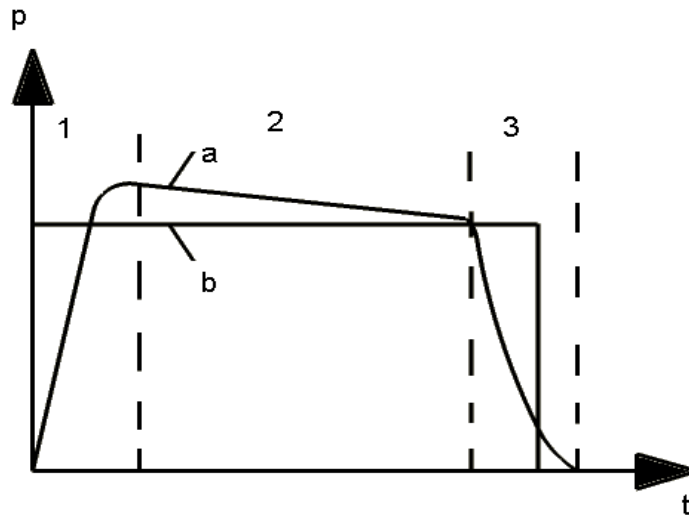
3.1.5. Nyomás az égőtérben

Három fő szakaszra bontható a hajtómű működése.

1. szakasz: indítás (kb. 0,1 s)

2. szakasz: munkafázis
3. szakasz: maradék gázok távozása

Az „a” görbe bemutatja a gáznyomás tényleges alakulását, az indítás (1) a munkafázis (2), és a maradék gázok távozásának (3) szemléltetésével. Egzakt módon nem írható le a $p(t)$ függvény, három görbe összegeként közelítik a gyakorlatban.



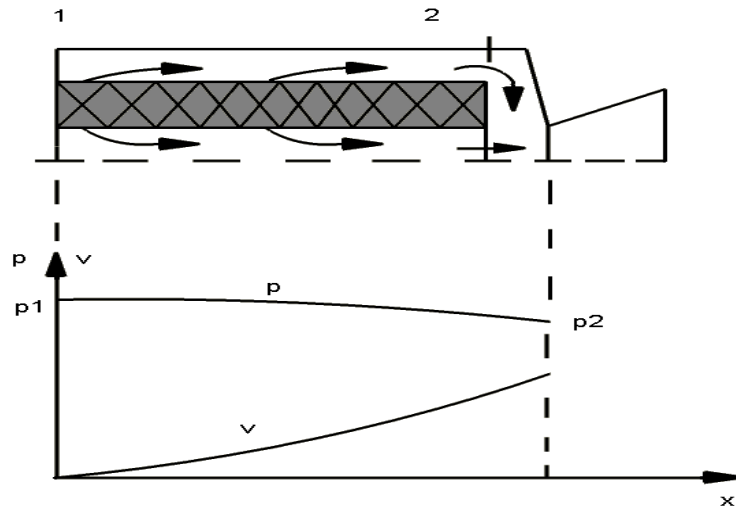
23. ábra Nyomás az égőtérben [16] [Néninger Attila Google sketchup]

Az égési folyamatok nagyon bonyolultak, ezért a mérnöki munkában közelítő képletek segítségével számolnak, melyek valós feltételezéseken és elhanyagolásokon alapszanak.

A 23. ábra „b” görbéje azt veszi alapul, hogy a stabilizált égés a maximális nyomás mellett a begyújtással egyidejűleg azonnal megkezdődik, és a töltet elégésének pillanatában (t_a) a gázok teljes mértékben eltávoznak a hajtóműből. A nyomás értékét végig állandónak tekintjük.

Az égéstermékek áramlási sebessége és statikus nyomása a következőképpen alakul:

Az „1” keresztmetszetben a gázok áramlási sebessége 0 m/s lesz, majd ezt követően fokozatosan növekszik (a helyi hangsebesség értékét nem lépheti túl). A „2” keresztmetszetben értéke eléri a maximumot. Ezzel egyező időben a gázok nyomása fokozatosan csökkenni fog. Az égéstermékek hőmérsékletét (jó közelítéssel) a folyamat alatt végig állandónak tekinthetjük. (azaz $T_1=T_2=\text{konstans}$)



24. ábra Nyomás és sebesség az égőtérben [16] [Néninger Attila Google sketchup]

3.1.6. Nyomás és sebesség az égőtérben

Az „1” keresztmetszet esetében a gázok nyomása a következő összefüggés segítségével számítható:

$$p_1 = \left(\frac{s \cdot \zeta \cdot b \cdot \sqrt{T}}{F_{kr} \cdot C_1 \cdot \xi} \right)^{\frac{1}{1-n}} \quad (16)$$

Ahol:

- F_{kr} – a fúvócső kritikus keresztmetszete;
- C_1 – gázkiáramlási együttható;
- ξ – a gázok összetételétől és a kiáramlás sebességétől függő tényező;
- s – égési felület;
- b – a töltet kezdeti hőmérsékletétől függő tényező;
- T – égéstermékek hőmérséklete;
- ζ – a töltet sűrűsége;
- n – a töltet anyagától függő égési kitevő;

C_1 gázkiáramlási együttható értéke az adott töltetre állandó:

$$C_1 = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2 \cdot (k-1)}} \cdot \sqrt{\frac{k}{R}} \quad (17)$$

Ahol:

- R – univerzális gázállandó;
- $k = \frac{c_p}{c_v}$, termodinamikai hőkapacitások hányadosa (állandó térfogaton és nyomáson).

A kiáramlási tényező számítására az alábbi képlet használható:

$$\xi = \frac{1 + \frac{k}{2} \cdot M_2^2}{1 + k \cdot M_2^2} \quad (18)$$

Ahol:

- $M_2 = \frac{v_2}{a_2}$ azaz „2” keresztmetszetben a gázok sebességének és a helyi hangsebességnek a hányadosa. ($a_2 = \sqrt{k \cdot R \cdot T_2}$).

A fenti összefüggéseket összegezve lehetőség nyílik a gázok nyomásának számítására a „2” keresztmetszetben:

$$p_2 = \frac{p_1}{1 + k \cdot M_2^2} \quad (19)$$

Az ellenőrzés és összehasonlítás érdekében célszerű kiszámítani p_1 , p_2 hányados értékét. A gyakorlatban M_2 értéket korlátozni kell, amely a további számításoknál alapvető befolyással bír. Az adott érték túllépése a hajtómű felrobbanásához vezethet, hogy ez ne történjen meg, a kapott eredménynek meg kell felelnie az $M_2 < 0,3$ feltételnek.

$$\frac{p_1}{p_2} = 1 + k \cdot M_2^2 \approx 1 + 1,2 \cdot 0,3^2 = 1,108 \approx 1,1 \quad (20)$$

Amennyiben p_2 ismeret, meghatározható a torlónyomás nagysága a fúvócső be-
menetén:

$$p_2^* = p_2 \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M_2^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (21)$$

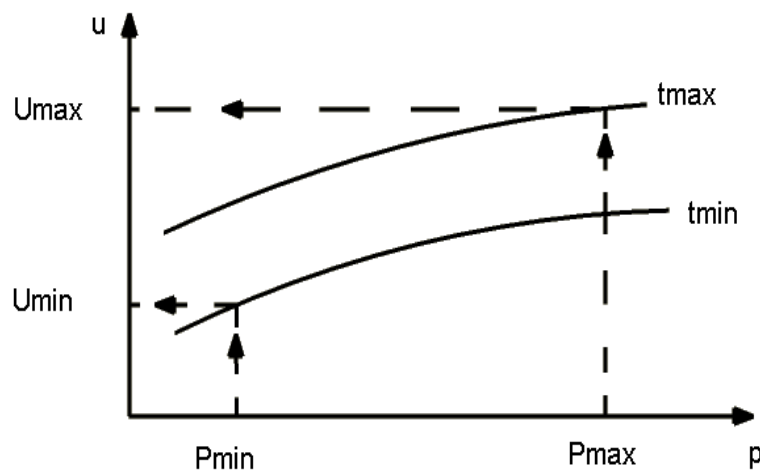
Mivel M_2 értéke megfelelően kicsi, sorbafejtés után a magasabb rendű tagok elha-
nyagolásával a következő kifejezést kapjuk:

$$p_2^* = p_2 \cdot \left(1 + \frac{k}{2} \cdot M_2^2 \right) \approx 1,054 \cdot p_2 \quad (22)$$

p_1 segítségével is kifejezhetjük:

$$p_2^* = p_1 \cdot \frac{1 + \frac{k}{2} \cdot M_2^2}{1 + k \cdot M_2^2} \approx p_1 \cdot \frac{1,054}{1,108} = 0,95 \cdot p_1 \quad (23)$$

A hajtómű égőterében kialakult nyomás meghatározó szerepet tölt be a töltet égési
sebességére való tekintettel.



25. ábra Égési törvény [16] [Néninger Attila Google sketchup]

A grafikonos eljárás segítségével a töltet különböző hőmérsékletei mellett figyelhető meg a nyomás és az égési sebesség összefüggése. A minimális és maximális értékeket lehet meghatározni az eljárással. A közbenső értékeket interpoláció segítségével számolják.

Fontos, hogy a nyomás stabilizálása érdekében az égés során keletkezett gázok mennyiségének egyeznie kell a fűvócsőből kiáramló gázok mennyiségével, azaz $m_g = m_f$.

Az egy másodperc alatt keletkezett gázok mennyisége arányos lesz a töltet égési felületével, mely a következő összefüggéssel számítható:

$$m_g = s \cdot \zeta \cdot u = s \cdot \zeta \cdot b \cdot p_1^n \quad (24)$$

A fűvócsőre vonatkoztatott egy másodperc alatt távozó gázok mennyisége az

$$m_f = C_1 \cdot \frac{F_{kr} \cdot p_2^*}{\sqrt{T_k}} \quad \text{képlettel fejezhető ki.} \quad (25)$$

p_2^* , p_1 közötti összefüggést figyelembe véve felírhatjuk:

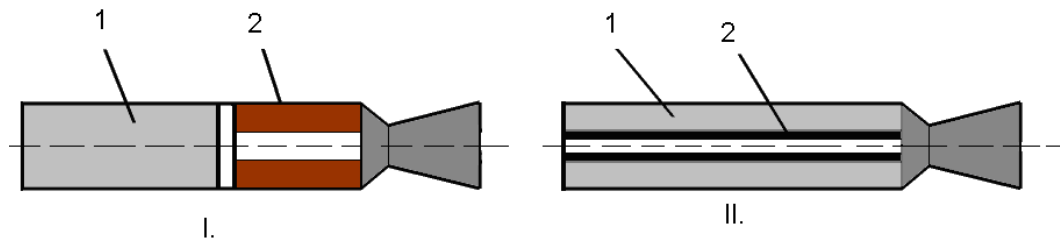
$$u = \frac{C_1 \cdot F_{kr} \cdot \xi}{s \cdot \zeta \cdot \sqrt{T_k}} \cdot p_1 \quad (26)$$

Mivel $u = \frac{C_1 \cdot F_{kr} \cdot \xi}{s \cdot \zeta \cdot \sqrt{T_k}} \cdot p_1 = \text{konstans}$, ezért észrevehető p_1 és u szoros összefüggése. [15][16]

3.1.7. Egyfokozatú és kétfokozatú hajtóművek

Nagy távolságba indított ($D_0 > 40$ km) rakéták esetén gyakran használatosak a kétfokozatú hajtóművek. Nem összekeverendő a többlépcsős rakétáknál felhasznált megoldással, mely összetettsége és járulékos szerkezeti elemek (több fűvóka,

leválasztószervezet stb.) miatt itt nem alkalmas a rakéta indulótömegének lecsök-
kentésére.



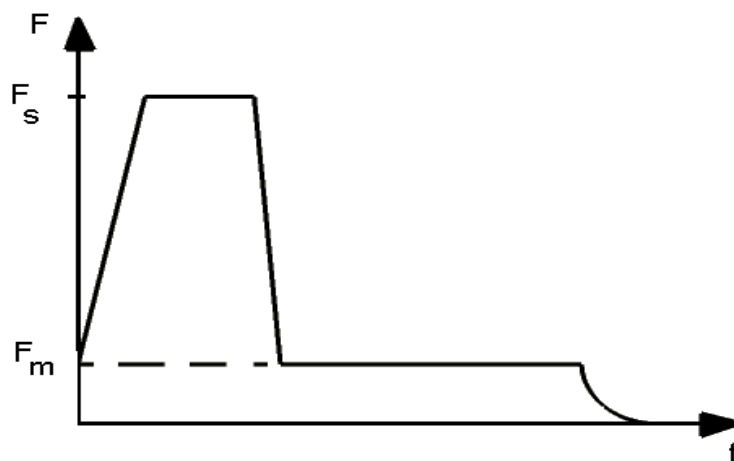
26. ábra Kétfokozatú SzHRH [11] [Néninger Attila Google sketchup]

Az 26/I. ábra szemlélteti a kétkamrás, a 26/II. ábra pedig az egykamrás hajtóművet. Mindkét hajtómű belsejében megtalálható az utazótöltet és a gyorsítótöltet.

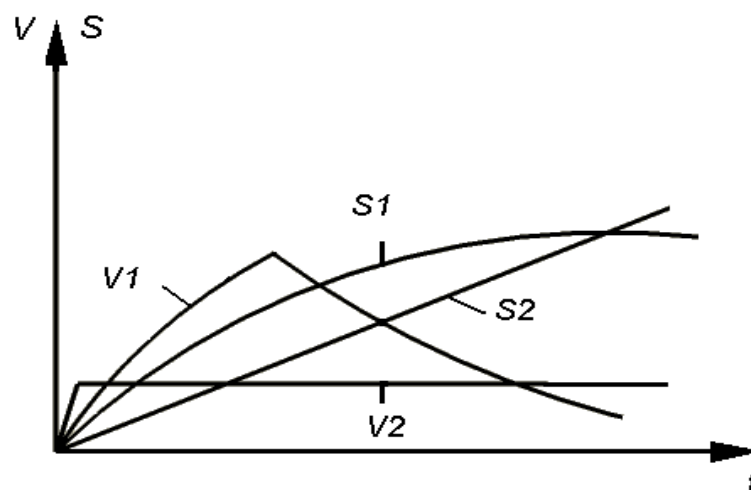
- 1- utazó-, vagy menettöltet
- 2- gyorsító-, vagy starttöltet

Az első eset elvi működés szempontjából hasonló azzal, mintha két hajtóművet egybeépítettek volna. A gyorsítótöltet égési sebessége jóval nagyobb az utazófokozaténál. Az utazótöltet tolóereje csupán egy ötöde a gyorsítóhajtóműnek. Az egyfokozatú hajtómű feladata, hogy a rakétát minél rövidebb idő alatt minél nagyobb sebességre felgyorsítsa, hogy a passzív szakaszon rendelkezzen megfelelő mozgási energiával, ami a célbajutáshoz nélkülözhetetlen. Nyilvánvaló, hogy a nagy sebesség által a légellenállás nagymértékben növekedni fog, ami a rakétát hátráltatva nagy fékezőerőt fejt ki.

Kétfokozatú hajtómű használata esetén a rakéta rövid idő alatt átlépi a hangsebességet, majd az utazóhajtómű elegendő tolóerőt fejt ki a légellenállás legyőzésére, ennek köszönhetően az aktív szakaszon a sebesség állandó marad. Azonos körülmények között a kétfokozatú hajtóművel működő rakéta nagyobb távolságot képes megtenni, ez azonban nem jelenti azt, hogy minden esetben alkalmasabb is az adott feladatra. Pontos számításokat követően lehet meghatározni, hogy melyik típus mellett szerepelnek a döntő paraméterek. [16]



27. ábra Gyorsító- és utazóhajtómű tolóereje [16] [Néninger Attila Google sketchup]



28. ábra Egyfokozatú és kétfokozatú hajtóművek sebesség és útviszonyai [16] [Néninger Attila Google sketchup]

3.1.8. Szilárd hajtóanyagok és formák

A rakéták hajtóanyaga alapvetően két összetevőből áll: oxidátorból és tüzelőanyagból, melyek begyújtását követően kémiai reakció jön létre, vagyis megtörténik az égés. A folyamat közben hőenergia szabadul fel, illetve az égőkamrában nagy nyomású gáz keletkezik. Mivel szilárd hajtóanyagról beszélünk, tudjuk, hogy a rakéták a tüzelőanyag mellett az oxidálószerrel is magukkal viszik kémiaiilag kötött formában valamely vegyületben.

A szilárd hajtóanyagok egyik neves csoportja a **homogén** hajtóanyagok. A homogén hajtóanyagok főbb tulajdonságai a következők:

- fizikailag egységes;
- kémiaiilag két- vagy többkomponensű zselatinált rendszer;

- többnyire szilárd oldatok, melyek az égéshez szükséges oxigént saját maguk tartalmazzák (nitrocsoport vagy salétromsav formájában).

A homogén hajtóanyagok tehát bizonyos nitrovegyületeknek és egyéb oxidálószereknek, stabilizátoroknak, fűtőanyagoknak stb. kolloid alapú homogén keverékei. Ide sorolható a zselatinált nitrocellulóz, mint egybázisú hajtóanyag vagy a dietilén-glikol-dinitrát szilárd kolloid oldata, mint kétbázisú hajtóanyag. Az utóbbi csoport jellemző komponense a ballisztit, mely a nitrocellulóz és a nitroglicerin elegye. Ez az anyag képes nagy felületen lejátszódó egyenletes égést biztosítani. Megfelelő eljárással kidolgozott összetétel esetén nagy teljesítőképességű és megbízható hajtóanyagot kapunk.

Másik kiemelkedő csoportjuk a keverék, összetett hajtóanyagok, ismert nevükön **heterogén** hajtóanyagok. Azokat a hajtóanyagokat tartalmazza, amelyeket az oxidálószer és a fűtőanyag mechanikai összevegyítése során állítottak elő. A heterogén szilárd hajtóanyagok több bázisú rendszerek.

Alkotói:

- oxidálószer (rendszerint kristályos, szervesetlen sók);
- tüzelőszer (szénben és hidrogénben gazdag vegyületek);
- adalékanyagok (stabilizáláshoz és az égési sebesség szabályozásához).

A szilárd hajtóanyag kiválasztásakor az alábbi követelményeket kell előtérbe helyezni:

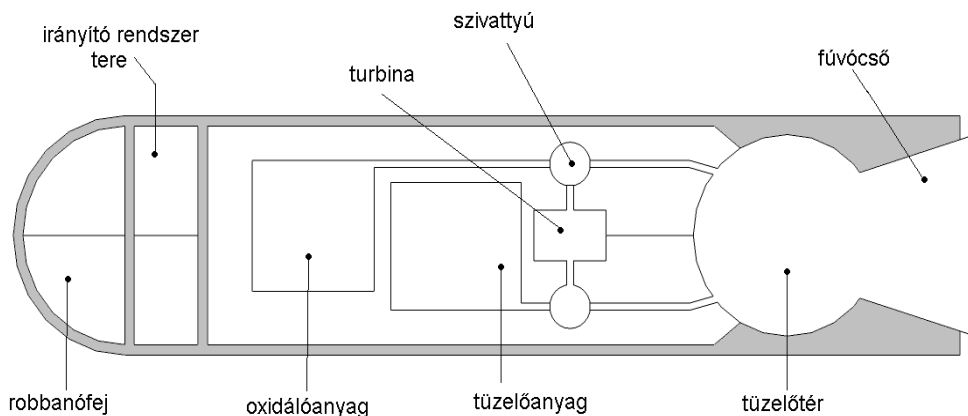
- a hajtóanyag sűrűsége, fajlagos energiája lehetőleg nagy legyen, ez által az égőtér kisebb lehet, a tömegviszony pedig nagyobb;
- az égési folyamatnak nem szabad megszakadnia a lehető legkisebb nyomásnál sem. Mivel az égőtér az egész hajtóanyagkészletet hordozza, a nagy nyomás túl nagy falvastagsághoz vezetne, ami a tömegviszony kedvezőtlenülne válását eredményezné;
- Fontos tényező, hogy mechanikai szilárdságának nagynak kell lennie. Azért kiemelkedő követelmény, mert a töltet folyamatosan nagy nyomás alatt áll, továbbá a gyorsító erők következtében tekintélyes igénybevételek is fellépnek. Az égés során a törésvonalak mentén az égőfelület növekedni fog, ami a nyomás növekedéséhez vezethet, ez pedig robbanást idézhet elő;
- Tárolás során nem léphetnek fel vegyi változások;

- A hajtóanyag ne legyen nedvszívó, a környezet hőmérséklete ne befolyásolja meghatározóan a hajtóanyag égését;
- Előállításuk lehetőleg olcsó legyen és veszélytelen. [1][3][5][16]

3.2. Folyékony hajtóanyagú rakétahajtómű

A folyékony hajtóanyaggal működő rakétákban általában két tartály kerül alkalmazásra. Az egyik a tüzelőanyagot (folyékony hidrogén, metán, alkohol) a másik pedig az oxidálószeret (folyékony oxigén) tartalmazza. A folyadékokat különböző berendezések, mint például a szivattyú, vagy esetleg sűrített gáz nyomása szállítja a tüzelőtérbe. A tüzelőanyag és az oxidálóanyag keveredéséből létrejött hajtókeverék meggyújtás nélkül lobbán lángra, vagy gyújtószikra segítségével érik el az égési folyamatot. A gyújtást elég a töltet indításakor egy alkalommal végrehajtani, hiszen a továbbiakban a folyékony tüzelőanyag az égést folyamatosan táplálni fogja. Az égéstermékek a fúvócsőn keresztül távoznak a tüzelőtérből.

A folyékony hajtóanyagú rakéták szerkezete összetettebb az SzHRH-nál. Szerkezeti felépítését az xy ábra szemlélteti:



29. ábra FHRH szerkezeti felépítése [9] [Néninger Attila Google sketchup]

Felépítése különböző problémákat vet fel. A kétfajta folyékony anyag hordozásához csővezetékek beépítésére van szükség. Alkalmazni kell szivattyút és további segédberendezéseket. További nehézséget jelent, hogy minden további szerkezeti egységet korlátozott méretezéssel lehet elhelyezni a rakéta belsejében.

A szállítás során a különböző folyadékoknak is sajátos igényeik vannak. A cseppfolyós oxigént például mínusz 200 °C körüli, a cseppfolyós hidrogént pedig

-250 °C-os hőmérsékleten kell tartani. A rakéta biztonságos működésének feltétele, hogy gondoskodni kell a tüzelőtér és a fúvócső falának megfelelő hűtéséről. Fontos tehát a tüzelőtér néhány ezer celsius fokos hőmérsékletének és 5 MPa körüli nyomásának, továbbá az oxidálószeres jelentékeny korróziós hatásának ellenálló anyagok megválasztása.

3.2.1. Hűtési módok

Regeneratív hűtés: a hajtókeverék valamelyik összetevőjét a beadagolást megelőzően a tüzelőtér és a fúvócsövet körülvevő csőkiágán vagy kettős falban vezetik végig. Így két dolog valósul meg. Egyrészt hűtik a falat, másrészt a folyadékot előmelegítve a hő egy részét visszanyerik.

Fátyolhűtés vagy filmhűtés: a tüzelőtér és a fúvócső belső falát folyadékártya elgőzölögtetésével hűtik. Előnye abból származik, hogy az elgőzölögő ártya azokat a felületeket hűti és védi, amelyeken a legnagyobb a hőigénybevétel.

Izzasztóhűtés: a tüzelőtér és a fúvócső fala likacsos anyagból készül. A hűtőfolyadékot legtöbb esetben a tüzelőanyag ezen falán kívülről nagy nyomással juttatják át a belső térbe, ahol elgőzölögve hűteni fogja a fal belső felületét.

Mint láthatjuk, a folyékony hajtóanyagoknak bőven van olyan tulajdonságuk, amik alkalmazásuknak korlátot szabnak. Azonban rendelkeznek hasznos tulajdonságokkal is, melyek még mindig szükségessé teszik használatukat.

Egyik legjelentősebb előnye, hogy az égési folyamat szabályozható. A hűtés alkalmazása révén az égés időtartama a szilárd hajtóanyagú rakétákkal szemben jelentősen növelhető. Ezek a tulajdonságok fontos befolyásoló tényezők a hadászati nagyrakéták és az űrhajózási hordozórakéták alkalmazásánál. Tolóerejük és sebességük könnyen szabályozhatóvá válik, a hajtómű működését befolyásoló vezérlőberendezéssel. A hosszabb égési idő pedig lehetővé teszi, hogy a közben kiáramló gázok megfelelő irányba vezetésével kormányozzák a rakétát. Ez a feladat megvalósítható gázsugárkormányokkal.

További előnyök közé sorolható, hogy a szilárd hajtóanyagúaktól eltérően itt csak magának a hajtóműnek és a fúvócsőnek a falait kell különleges igénybevételre tervezni, ez pedig a rakéta kisebb részét jelenti csak.

3.2.2. Táprendszerek

A folyékony hajtóanyagú rakéták táprendszerrel rendelkeznek, mely a tüzelőanyagot és az oxidálóanyagot a tartályokból a megfelelő mennyiségben a tüzelőtérbe juttatja. Ezeknek a segédberendezéseknek két fő típusát különböztetjük meg:

- kiszorító táprendszer
- szivattyús táprendszer.

Ha fent említett feladatot sűrített, nagy nyomású gáz teljesíti, akkor kiszorító a rendszer, ha pedig szivattyú a feladatért felelős berendezés, akkor szivattyús táprendszerről beszélünk.

Kiszorító táprendszer: kisebb méretű és rövid üzemidejű rakétákban alkalmazták. A sűrített gázt gázgenerátorokban állítják elő, vagy palackokban tárolják. Utóbbi esetén pneumatikus táprendszerről beszélünk. A gázgenerátorban két folyékony összetevőt vegyítenek. Tüzelőanyag és oxidálóanyag keverékét égetik el. Ezt nevezik folyadékos táprendszernek. Lőportöltet égetése esetén lőporos táprendszerről beszélünk. A rendszerek hátrányos tulajdonsága, hogy a folyadékot mintegy 4-5 MPa nyomással távolítják el a hajtóanyagtartályokból, ez a tartályok falvastagságának növelését igényli, ami viszont a szerkezet tömegnövekedéséhez vezet, károsítva ezzel a kedvező indítási paramétereket.

Szivattyús táprendszer: nagy tolóerejű, hosszabb üzemidejű rakéták körében használatos. Jellemzőségük, hogy viszonylag nagy méretű hajtóanyagtartályokkal rendelkeznek. Ezért a folyadékot csak néhány tized MPa nyomással lehet hordozni, ezért a kiszorító táprendszerek nem jöhetnek szóba.

A szállító centrifugál-szivattyút gázturbinával hajtják. A táplálógenerátor itt is lőporos vagy folyadékos működésű. A szivattyús táprendszerek előnye, hogy viszonylag kis nyomásokat okoznak, így nem kell a tartályok falát vastagra méretezni. Hátrányuk a szerkezetből adódó bonyolultság és a magas előállítási ár.

Összegzésként megállapíthatjuk, hogy a folyékony hajtóanyagú rakéták legnagyobb hátránya a szerkezeti felépítésből származik. Sok a mozgó alkatrész, ami jelentős mértékben növeli az esetleges meghibásodások számát is. Üzemeltetésük meglehetősen körülményes, karbantartásuk, szerelésük bonyolult. [6][7][9][10]

4. SZILÁRD ÉS FOLYÉKONY HAJTÓANYAGÚ RAKÉTÁK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Megnevezés	Szilárd hajtóanyagú rakéta	Folyékony hajtóanyagú rakéta
Szerkezet	Egyszerű	Bonyolult
Legnagyobb tömegarány	Kb: 14	Kb: 9
Legnagyobb effektív gázkiáramlási sebesség	Kb: 3000 m/s	Kb: 4000 m/s
Égéstartam	Max. 120 s	Nem korlátozott
Különleges szerkezeti anyagok	Nem szükségesek	Szükségesek
Égési folyamat szabályozása	Körülményes	Viszonylag egyszerű
Ismételt indítás	Csak kivételesen	Mindig
Távozó égéstermékek felhasználása kormányzásra	Körülményes	Viszonylag egyszerű
Táprendszer	Nincs	Szükséges
Szállítás	Nehéz és veszélyes	Egyszerű
Tűzkész állapot	Gyorsan elérhető	Hosszabb előkészítés után
Gyártás	Viszonylag egyszerű	Körülményes
Karbantartás	Egyszerű	veszélyes

ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatomban igyekeztem a lehető legfontosabb szempontokat tárgyalni a rakétaműködésre és a hajtómű kialakításokra való tekintettel.

Számos irodalmat és internetes adatbázist olvasva nyilvánvalóvá vált számomra, hogy mind a szilárd és mind a folyékony hajtóanyagú rakéták alkalmazására szükség van. Számos tulajdonságuk lehet veszélyes, de jelenleg más megoldások hiányában alkalmazzák őket.

A mai, korszerűnek mondható űrbéli szállítórendszerek gyakorlatilag kizárólag a kémiai reakciókra épülő rakétákat részesítik előnyben. Hátrányuk, hogy a rossz hatásfok miatt óriási mennyiségű üzemanyagra van szükségük, ráadásul ennek az üzemanyagnak a felemelésére is további üzemanyag-mennyiség szükséges. Jelenleg az űrbe induló rakéták tömegének 85%-a üzemanyag. Ezen rakéták elkészítése biztonsággal megoldható, és az 1950-es évek óta nagyon sok elméleti és gyakorlati tapasztalatra tettek szert üzemeltetésükkel kapcsolatosan.

A további fejlesztések elkerülhetetlenek, hiszen mindig adódik újabb technikai probléma, melyek kiküszöbölése csak újabb gyakorlati tesztelésekkel lehetséges. Mint tudjuk egy-egy rakétával végrehajtott feladat meglehetősen veszélyes és költséges. Ez akadályozza a kutatók munkáját napjainkban is.

Sikeresen teszteltek ionhajtóművet, melyben (napelemekből származó) elektromos energiával gázt (xenont) ionizálnak, és az ionokat elektromos mező segítségével gyorsítják. A hajtómű nagy előnye, hogy azonos mennyiségű üzemanyaggal jóval nagyobb sebesség érhető el. Sajnos, azonban van egy nagy hátránya: a tolóereje nagyon kicsi. Egy ionhajtómű teljesítménye csupán töredéke egy kémiai hajtóműnek. Azonban, míg az utóbbi ezt a teljesítményt rövid idő alatt adja le és hamar elfogy az üzemanyaga az ionhajtómű több napig képes működésben maradni. Fő kedvező tulajdonsága tehát, hogy a kémiai hajtóanyagokkal összehasonlítva sokkal kevesebb anyagot használ fel azonos impulzus elérésére.

A téma tanulmányozása során rengeteg kudarcba fulladt kísérlettel találkoztam, melyek a bevezetésben is említett tragikus véget értek. A balesetek többnyire tervezési hibáknak köszönhetőek. Ennek különböző okai vannak. A fejlesztések során sokszor nem számolnak az adott környezetbeli eltérésekkel és annak jelentő-

sége a kísérlet végrehajtása során megmutatkozik. A legtöbb balesetet előidéző fő probléma mégis az emberi türelmetlenség.

Azt viszont nem mondhatjuk, hogy valamennyi kísérlet hiábavaló lenne, hiszen bizonyos értelemben a rakétatörténetben a kutatómunkák egymásra épülnek mint az élet más tudományágai is. [18]

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] A repülőfedélzeti fegyverberendezések működésének és üzemeltetésének alapjai I. könyv (920/531 szabályzat)
- [2] Zsilák András mk. alez.: Repülőgép-fedélzeti fegyverek megsemmisítő eszközei, 598/479, KGyRMF, 1984
- [3] Zsilák András mk. alez.: Repülőgép-fedélzeti fegyverek megsemmisítő eszközei, 598/479, KGyRMF, 1984,
- [4] Idegen hadseregek katonai repülőerőiben rendszeresített főbb fedélzeti pusztító eszközök (Id/16 szabályzat)
- [5] A repülőfegyverzet üzemben tartásának elméleti alapjai IV. Repülőszerek (Re/997)
- [6] Bill Gunston.: Korszerű harci repülőgépek fegyverzete, Zrínyi Kiadó 1995
- [7] Nagy István György-Lőrincz István Rakétatechnika-Rakétafegyver, Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest, 1969
- [8] Papp Bálint-Nagy István György- Dr. Tamási Zoltán Rakétafegyver, Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest, 1962
- [9] Nagy István György-Szentesi György Rakétafegyverek, űrhajózási hordozórakéták, Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest, 1983
- [10] Szurikov mérnök ezredes Rakéták a harcban, Zrínyi Katonai Kiadó, Budapest, 1967
- [11] <http://hmika.freeweb.hu/Fizika/Html/ErdRaket.htm>
- [12] <http://www.geographic.hu/index.php/fotopalyazat/fotopalyazat/nyomtathato.php?act=napi&id=8445>
- [13] <http://www.haditechnika.hu/ARCHIVUM/198304/830402.htm>
- [14] <http://www.haditechnika.hu/Archivum/196901/690104.htm>
- [15] Repülőfedélzeti rakéták I, II, tantárgy, RLI, saját jegyzet
- [16] Kakula János mk. őrnagy Rakéták szerkezetana; TK615, KGyRMF, 1989.
- [17] <http://hu.wikipedia.org/wiki/Laval-f%C3%BAv%C3%B3ka>
- [18] <http://astro.u-szeged.hu/szakdolgozas/vegianndras/mukodes/ionhajtomu.html>