

IONSKI IZVIRI ZA POGON VESOLJSKIH PLOVIL

Peter Panjan, Miha Čekada, Institut "Jožef Stefan", Jamova 39, 1000 Ljubljana

Ion propulsion systems for spacecraft

ABSTRACT

Recently, NASA launched the Deep Space 1 spacecraft equipped with a high-performance ion-propulsion system. However, this is not the first spacecraft to use an ion source as the primary propulsion system. For some time they have been used for orbit correction of geosynchronous satellites. The engine provides 10 times the specific impulse of chemical propulsion. Therefore ion propulsion systems reduce the weight and cost of carrying propellant. In this paper the physical basics of such systems are described.

POVZETEK

Pred kratkim je ameriška vesoljska agencija NASA poslala v vesolje sondo Deep Space 1, ki jo poganja ionski izvir. To pa ni prvi primer uporabe ionskih izvirov za pogon vesoljskih plovil. Že dlje časa jih uporabljajo tudi za korekcijo orbite geostacionarnih satelitov. Ionski izviri dajejo specifične impulze, ki so 10-krat večji od tistih, ki jih dobimo s pogonskimi sistemi na osnovi kemijskih goriv. Zato tak način pogona vesoljskih plovil zmanjšuje maso in ceno potrebnega goriva. V prispevku opisujemo osnovne fizikalne zakonitosti, na katerih temelji delovanje ionskih izvirov za pogon vesoljskih plovil.

1 Uvod

Pred kratkim se je na internetu /1/ in v časopisih /2/ pojavila vest, da so Američani poslali v vesolje satelita in sondo, ki so jih namesto s klasičnimi pogonskimi motorji na kemično gorivo opremili z **ionskimi izviri s širokim curkom**. Na internetu si lahko ogledate celo kratek video posnetek delovanja takšnega pogonskega motorja. Zamisel ni nova. Že v šestdesetih letih, ko so raziskovalci začeli razvijati ionske izvire s širokim curkom, so ugotovili, da bi bili takšni izviri primerni za pogon vesoljskih plovil /3/. V laboratorijih raziskovalnega centra Lewis pri NASA so že leta 1960 eksperimentalno potrdili takšno možnost pogona plovil. Zelo aktivni so na tem področju tudi ruski raziskovalci. Grigoryan navaja /4/, da se na ruskih komunikacijskih satelitih ionski pogonski sistemi uporabljajo že od začetka osemdesetih let.

Ob tem se nam samo po sebi postavlja vprašanje, kako to, da je do praktične uporabe ionskih izvirov za pogon vesoljskih plovil prišlo šele po nekaj desetletjih. Razlogov za to je več. Prvi ionski izviri so za pogon uporabljali zelo reaktiven cezij in pare živega srebra, ki so zelo toksične. Drugi razlog je bila nezadostna oskrba plovil z električno energijo. Sončne celice, ki so jih poznali v tistem času, niso dajale dovolj električne energije za pogon ionskih izvirov. V strahu, da draga vesoljska odprava ne bi uspela in da ne bi izgubili dragocenih znanstvenih podatkov, so se vodilni pri vesoljskih agencijah dolgo časa upirali uporabi nepreizkušene tehnologije.

Izvire s širokim curkom so raziskovalci med tem časom še naprej izpopolnjevali. Danes se uporabljajo tudi na številnih področjih sodobne industrije (npr. za čiščenje podlag z ionskim jedkanjem, za modifikacijo površin z ioni, za naprševanje tankih plasti). Napredek je bil tolikšen, da je omogočil uspešno uporabo takšnih izvirov tudi v aeronavtiki. Prototip ksenonovega ionskega motorja so prvič uspešno preizkusili na kalifornijskem

tehnološkem inštitutu v "Jet Propulsion Laboratory" septembra 1997. Preizkus je potekal v posebni vakuumski posodi. Preizkušali so predvsem vzdržljivost takšnega izvira pri nekajdnevni polni obremenitvi. Temu je sledilo ciklično vklopjanje in izklopjanje izvira.

Preizkusi so bili uspešni, zato so takšen pogonski sistem vgradili v vesoljsko plovilo **DS1** (Deep Space 1), ki so ga 24. novembra 1998 poslali v vesolje. DS1 je prva sonda iz programa "Deep Space", v katerem bodo preizkusili serijo novih tehnologij, ki jih nameravajo uporabiti pri znanstvenih odpravah na začetku 21. stoletja. V misiji DS1 bodo poleg ionskega motorja preizkusili tudi navigacijski sistem in sistem za oskrbo z energijo. Sonda bo obiskala asteroid 1992KD in po možnosti kometa Wilson-Hamington in Barrely.

To pa ni bil prvi primer uporabe ionskih pogonskih motorjev v aeronavtiki. Rusi jih že od začetka osemdesetih let uporabljajo na komunikacijskih satelitih za korekcijo njihovega položaja. Leta 1997 je tudi ameriška vesoljska in telekomunikacijska družba Hughes lansirala dva komercialna komunikacijska satelita, opremljena s ksenonovimi ionskimi izviri. Problem geostacionarnih satelitov je v tem, da se jim zaradi gravitacijskih motenj Sonca in Lune spreminja naklon orbite glede na ravnino zemeljskega ekvatorja. Zaradi sploščenosti Zemlje se sateliti premikajo tudi v smeri vzhod-zahod. Zaradi tlaka sončnega vetra pa izgubljajo višino. Zato je treba položaj satelitov občasno popravljati. V ta namen so obstoječi sateliti opremljeni z motorji na kemijsko gorivo, ki jih vključijo periodično (približno enkrat na štirinajst dni). Problem motorjev na kemijski pogon pa je relativno majhen specifični impulz, zato porabijo veliko goriva. Tako nosijo sateliti s seboj od 450 do 600 kg goriva, ki zadošča za približno 15 let. Pogonski sistemi z ionskim izvirom imajo 10-krat večji specifični impulz od obstoječih motorjev na kemijsko gorivo, zato porabijo znatno manj goriva, kar bistveno poceni izstrelitev satelita.

2 Raketni motorji s kemijskim izgorevanjem

Osnovna enačba, ki opisuje gibanje rakete, temelji na izreku o ohranitvi gibalne količine, ki pravi, da je sprememba gibalne količine rakete enaka sunku sile izhodnega plina:

$$m_r \Delta v_r = F \Delta t = dm/dt v_p \Delta t$$

m_r je masa rakete in Δv_r sprememba njene hitrosti v časovnem intervalu Δt , dm/dt je masni tok plina, ki leti iz izpušne šobe s hitrostjo v_p . Produkt masnega toka in hitrosti plina imenujemo **potisna sila** (F) raketnega motorja. Celotni izraz na desni, ki je enak sunku sile raketnega motorja, imenujemo **totalni impulz**. Bistveni podatek za učinkovitost raketnega motorja pa je njegov **specifični impulz**, ki je definiran kot totalni impulz na enoto mase goriva ($F \Delta t / m$). V tehnični literaturi se spe-

cifični impulz ponavadi podaja v sekundah, in sicer nas zanima, koliko časa bo 1 kg goriva dajal potisno silo 1 kp (=9,8N). Čim dlje časa bo dana količina goriva dajala zahtevano potisno silo, tem manjša bo poraba goriva.

Današnji raketni motorji uporabljajo za pospeševanje atomov oziroma molekul plina kemijske reakcije med gorivom in oksidantom. Kinetična energija izstopajočih atomov oz. molekul plina je okvirno 0,2 eV, kar ustreza njihovi termični energiji. Hitrost izstopajočih molekul reakcijskih produktov je torej sorazmerna kvadratnemu korenu razmerja med njihovo temperaturo in molekulska masa. Obe količini imata omejeni vrednosti, zato hitrost izstopajočih delcev ne more preseči 5000 m/s.

Klasične raketne motorje delimo v dve veliki skupini, in sicer na motorje na trdo gorivo in motorje na tekoče gorivo. Pri raketnih motorjih na trdo gorivo se tako gorivo kot oksidant nahajata v izgorevalni komori in ob vžigu začne gorivo kontrolirano izgorevati. Slaba stran raketnih motorjev na trdo gorivo je, da se ne da uravnavati moči in da jih ne moremo izklopiti. Kljub temu se pogosto uporabljajo - od novoletnih raket do prve stopnje raketoplana Space Shuttle. Značilna kombinacija gorivo/oksidant je aluminijev prah/amonijev perklorat.

Raketni motorji na tekoče gorivo, ki se v vesoljski tehnologiji pogosto uporabljajo, imajo dva ločena rezervoarja za gorivo in oksidant, ki jih s črpalkami vbrzgovamo v izgorevalno komoro. Uporabiti moramo tako kombinacijo gorivo/oksidant, da dobimo čim večjo hitrost izstopnih plinov. To pomeni, da mora biti temperatura kemijske reakcije čim višja in molekulska masa izstopajočega plina čim manjša. Kot oksidant se ponavadi uporablja tekoči kisik, kadar pa je njegovo skladiščenje (vrelišče -183°C) težavno, pa dušikovo kislino HNO₃ ali dušikov tetraoksid N₂O₄. Za gorivo je primeren tekoči vodik, kerozin (mešanica ogljikovodikov) ter hidrazin (N₂H₄) in njegovi derivati.

Nasprotno od opisanih raketnih motorjev na tekoče gorivo pa posebne vrste le-teh ne izkoriščajo oksidacije goriva, ampak dekompozicijo hidrazina ob navzočnosti katalizatorja, kar je eksotermna reakcija. Te motorje imenujemo tudi enokomponentne, nasprotno od običajnih, dvokomponentnih motorjev na tekoče gorivo. Specifični impulz je sicer manjši, je pa sistem veliko enostavnejši in ga uporabljajo za majhne korekcije smeri (Tabela 1).

Poznamo še več alternativnih metod pospeševanja izstopnih molekul. Pri elektrotermičnih motorjih segrevamo delovni plin z mikrovalovi, elektronskim lokom ali uporovnim grelnikom namesto s kemijsko reakcijo. Drugi način pa je elektrostatsko pospeševanje nabitih delcev, ki ga bomo v nadaljevanju podrobneje opisali.

3 Raketni motorji z ionskim izviro

O ionskih izviroh s širokim curkom smo v Vakuumistu že pisali /3/, kjer smo podrobneje opisali t.i. Kaufmanov ionski izvir. Takšen izvir smo pred več kot desetimi leti konstruirali in izdelali tudi na Institutu "Jožef Stefan", v Odseku za tanke plasti in površine /4/.

Za pogon vesoljskih plovil je primernih cela vrsta ionskih izvirov. Nekoliko podrobneje bomo opisali le tistega, ki poganja DS1 (slika 1). Ionski izvir na sondi DS1 uporablja ksenon, ki je pod pritiskom približno 100 atm shranjen v posebnem rezervoarju (na sondi DS1 je 81,5 kg ksenona, kar zadostuje za približno 20 mesecev neprekinjenega delovanja izvira). Za delovni plin ionskih izvirov uporabimo težke pline, saj je potisna sila sorazmerna s kvadratnim korenom iz atomske mase izstopnega plina.

V ionizacijski komori s posebnim izvirov elektronov (termoionska votla katoda) ioniziramo atome ksenona. Katoda je v bistvu cevka iz kovine z visokim tališčem, ki ima drobno odprtino, pred katero je porozen volframov cilindar, impregniran z barijevim oksidom. Ta omogoča delovanje izvira že pri relativno nizkih temperaturah katode. Gostota toka elektronov je približno 1A/cm². Večina teh elektronov nadaljuje pot proti anodi. Magnetno polje, ki ga ustvarjajo permanentni magneti, podaljša pot elektronov in s tem poveča verjetnost za ionizacijo. Gostota plazme v ionizacijski celici je relativno majhna: 10¹¹ ionov in elektronov na cm³, medtem ko je gostota atomov ksenona približno 10¹²/cm³. Izkoristek takšne ionizacijske celice pa je dokaj velik, saj se skoraj 70% dovedene energije porabi za formiranje in pospeševanje ionov.

Z dvema perforiranimi molibdenovima elektrodama, med katerima je približno 1000 V električne napetosti, potegnemo ione iz plazme in jih pospešimo do zelene energije. V vsaki elektrodi je več tisoč luknjic. Luknjice posameznih elektrod se medsebojno natančno prekrivajo. Notranja elektroda je na potencialu, ki je več sto voltov višji od potenciala vesoljskega plovila. Ioni, ki

Tabela 1 Tipi raketnih motorjev in njihove glavne značilnosti /8/

tip raketnega motorja	specifični impulz [s]	čas obratovanja	sedanje stanje
kemični na trdo gorivo	180-300	nekaj sekund do nekaj minut	v uporabi
kemični na tekoče gorivo (dvokomponentni)	200-460	nekaj sekund do nekaj minut	v uporabi
kemični na tekoče gorivo (enokomponentni)	150-235	nekaj sekund do nekaj minut	v uporabi
elektrotermični (lok)	300-2000	nekaj dni	razvoj ustavljen
ionski (elektrostatski)	1000-25000	nekaj mesecev	uporaba se začena

prispejo do notranje elektrode, so pospešeni z negativnim potencialom na zunanji elektrodi. Napetost na tej elektrodi je približno 20% napetosti na pozitivni elektrodi. S to elektrodo fokusiramo ione, ki potujejo skozi luknjice. Negativna napetost pospeši ione, hkrati pa prepreči pot elektronom skozi luknjice. Zunanja elektroda je na negativni napetosti nekaj voltov. Ione v curku nevtralizirajo z elektroni iz izvira z votlo katodo. Z nevtralizacijo ionov preprečijo, da bi se plovilo naelektrilo negativno.

Sonda DS1 je opremljena z ionskim izvirom s 30 cm širokim curkom ksenonovih atomov. Električno napajanje izvira zagotavljajo sončne celice, ki proizvajajo 2000W moči. Energija ionov je okrog 1000 eV, torej okrog 10000-krat več, kot je energija molekul, ki izhajajo skozi šobe klasičnih raketnih motorjev. Odgovarajoča hitrost atomov je 30 km/s. Masa vseh ionov, ki zapustijo ionski izvir, pa je še vedno izjemno majhna. Sila je pri maksimalni moči izvira (2000W) le okrog 90 mN, kar je 10000-krat manj od potisne sile raketnih motorjev s klasičnim pogonom, in ustreza pritisku lista papirja na dlan roke. Vendar pa se hitrost plovila tudi pri majhni moči motorja zelo poveča, če je le čas delovanja dovolj dolg. Ionski pogonski sistem na sondi DS1 bo povečal hitrost le-te na 3,6 km/s. Uporaba ionskega motorja je zato smiselna pri spremembi trajektorije vesoljske sonde med medplanetarnimi polety, pri pospeševanju sond v zunanji del Osončja in pri drugih nalogah v vesolju, kjer lahko pospeševanje traja dalj časa (tudi po več mesecev).

Da bi si pridobili potrebne izkušnje za prihodnje vesoljske polete, so sondo DS1 opremili s številnimi diagnostičnimi napravami: dvema Langmuirjevima sondama, magnetometri, senzorji plazemskih valov,

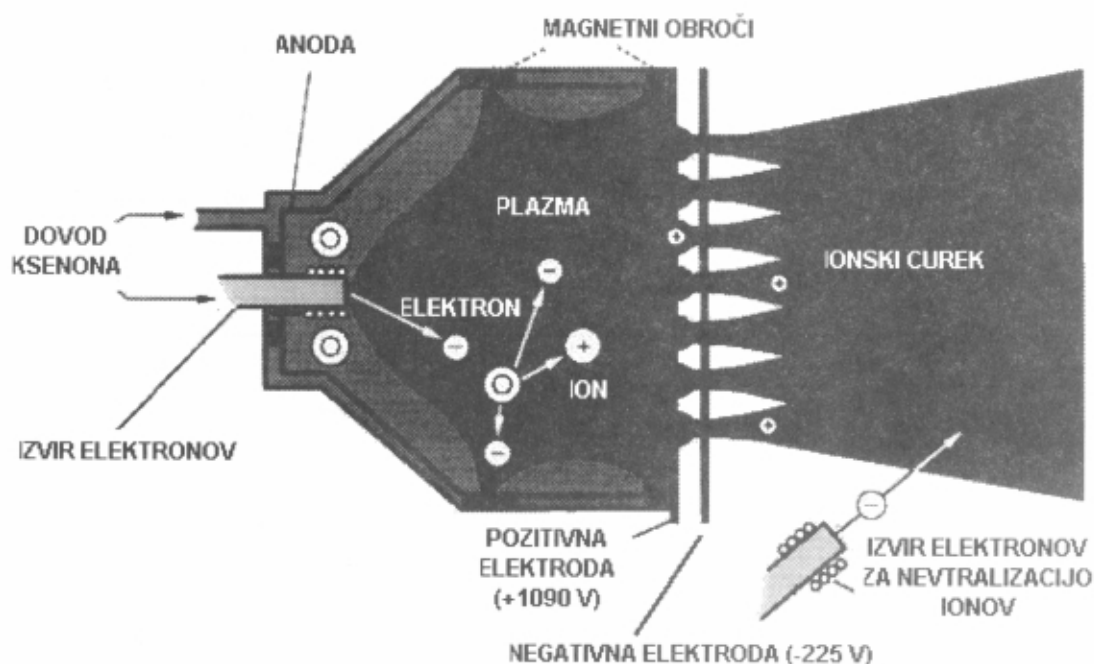
dvema kremenovima mikrotehnicama, kalorimetrom itd. Z omenjenimi napravami merijo v bližini vesoljskega plovila kontaminacijo s ksenonovimi atomi, spremljajo razprševanje molibdenovih elektrod, gostoto elektronov in ionov v bližini plovila, električno in magnetno polje itd.

4 Sklep

Pogonski sistemi z ionskimi izviri niso primerni za tista vesoljska plovila, od katerih se zahtevajo veliki pospeški, pa tudi ne za kratke odprave (npr. na Luno). V teh primerih se bodo še naprej uporabljali konvencionalni pogonski sistemi na kemijsko gorivo. Pač pa so takšni pogonski sistemi primerni za odprave, kjer potrebujemo veliko energije v daljšem časovnem obdobju, npr. za pot vesoljskih plovil do asteroidov, kometov in do zunanjih delov Osončja.

5 Literatura

- /1/ <http://nmp.jpl.nasa.gov/ds1/>
- /2/ J.R. Beattie, The Industrial Physicist, June 1998, 24-26
- /3/ V. Ribarič, Cilj vesolje, Cankarjeva založba, Ljubljana, 1961, 116
- /4/ V.G. Grigoryan, Rev. Sci. Instrum. 67 (3), marec 1996, 1126-1131
- /5/ P. Panjan, A. Žabkar, B. Navinšek, Vakuumist, 13, 1, 1993, 14-17
- /6/ A. Žabkar, P. Panjan, B. Navinšek, Bilten JUVAK št. 22, 1986, 76
- /7/ Thin Film Processes II, Ed. J.L. Vossen in W. Kern, Academic Press, Inc., Boston, 1991, 63-68
- /8/ The 1995 Grolier Multimedia Encyclopedia, Grolier Electronic Pub. Inc., 1995, geslo: rockets and missiles



Slika 1 Shema ionskega izvira za pogon vesoljskih plovil /1/