

Eksperimentalna ispitivanja uticaja igle na aerodinamičke karakteristike rakete

Mr Snežana Milićev, dipl.inž.¹⁾
Dr Slavica Ristić, dipl.inž.²⁾
Aleksandar Vitić, dipl.inž.²⁾

Prikazani su eksperimentalni podaci o ispitivanjima modela rakete polusfernog vrha sa iglom i bez igle. Model je testiran u malom trisoničnom aerotunelu T-36. Ispitivanja su izvršena pri Mahovom broju $M=1.9$, Rejnoldsovom broju $Re=0.38$, dok je promena napadnog ugla modela bila u opsegu od $\alpha \in [-4^\circ, 10^\circ]$, sa korakom 2° . Vizualizacija strujnog polja vazduha izvršena je Schlieren metodom. Pokazano je da igla ima značajan uticaj na poboljšanje aerodinamičkih karakteristika rakete. Zaključci su potvrđeni Schlieren snimcima.

Ključne reči: Aerodinamika rakete, nadzvučno opstrujavanje, telo polusfernog vrha sa iglom, strujna slika, udarni talas, aerodinamički koeficijent.

Korišćene oznake i simboli

M	– Mahov broj u neporemećenoj struji radnog dela aerotunela,
p_o	– zaustavni pritisak u radnom delu, [bar]
T_o	– zaustavna temperatura, [K]
Re	– Rejnoldsov broj, [1/m]
p	– statički pritisak u radnom delu aerotunela, [bar]
d	– prečnik modela, [m]
q	– dinamički pritisak u radnom delu, [bar]
α	– napadni ugao modela, [°]
C_d	– koeficijent otpora modela rakete bez igle,
C_{di}	– koeficijent otpora modela rakete sa iglom,
C_l	– koeficijent uzgona modela rakete bez igle,
C_{li}	– koeficijent uzgona modela rakete sa iglom,
L	– otpor,
D	– uzgon,
S_{ref}	– referentna površina.

Uvod

NA zaobljena tela pri kretanju nadzvučnim brzinama kroz vazduh deluju velike otporne sile. Izuzetno snažan udarni talas, koji se tom prilikom javlja ispred tela, izaziva visoke vrednosti pritiska u okolini prednje zaustavne tačke tela, što znači veliki intenzitet sile čeonog otpora. U istoj oblasti dolazi do značajnog porasta temperature tela, odnosno do tzv. aerodinamičkog zagrevanja tela [1-8, 10, 11].

Ugradnjom igle na vrh zaobljenog tela moguće je značajno smanjenje otpora pri kretanju tog tela nadzvučnim brzinama. Tada je potrebna manja pogonska sila za savladavanje otpora, a time i manja potrošnja goriva. Druga, vrlo važna, uloga igle je smanjenje intenziteta prelaženja toplote

od zagrejanog vazduha koji opstrujava zaobljeno telo ka telu, čime se smanjuje njegovo zagrevanje. Igla, takođe, povećava uzgon tela, utoliko više ukoliko je ugao između pravca vektora njegove brzine i ose tela, tzv. napadni ugao, veći. Kao primer ovakvih tela, mogu poslužiti sve letelice koje se kreću brzinama većim od brzine zvuka: neke vrste aviona, kosmički brodovi, rakete i sl. Ako su u pitanju rakete koje se koriste protiv oklopnih ciljeva, igla može da posluži i kao odstonik koji izaziva kašnjenje od nekoliko mikrosekundi od momenta kad njen vrh dodirne cilj do momenta eksplozije bojeve glave. U sličnom slučaju igla može da posluži i kao uređaj koji pravovremeno (u trenutku dodira vrha igle i oklopa) aktivira upaljač, tako da eksplozivno punjenje specijalnog oblika ima najveću probojnu moć, tzv. kumulativni efekat.

Strujna slika obrtnog tela sa iglom

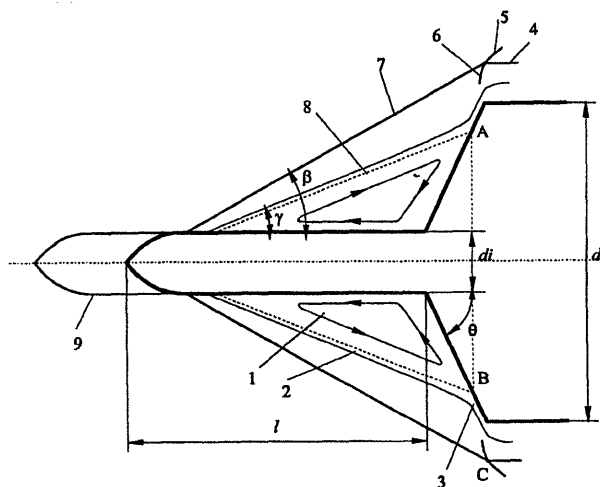
Razmatran je uticaj igle pri nadzvučnom opstrujavanju rakete kalibra d , dužine $4.44 d$. Ispitivana raketa (telo, model) je sledeće konfiguracije: prednji deo oblika polusfere, cilindrični deo, i zadnji deo oblika konusa čija izvodnica zaklapa ugao od 9° sa izvodnicom cilindričnog dela. Eksperimentalna analiza izvršena je za model kalibra 27 mm bez igle i sa iglom cilindričnog oblika konusnog vrha, ugla pri vrhu 20° . Dužina igle l jednaka je kalibru rakete $l=d$, a prečnik cilindričnog dela je $d_i=0.17d$. Kako se u radu analiziraju efekti igle na raketu polusfernog vrha, to su ispitivane konfiguracije bez ikakvih upravljačkih površina. U oba slučaja ugao između ose projektila i supersonične struje α variran je u intervalu od -4° do 10° sa korakom od 2° .

Na sl.1 je prikazana skica strujne slike [3,11], koja se bavi uticajem igle na izmenu karaktera strujanja pri nadzvučnom opstrujavanju tela. Obeležene su karakteristične

¹⁾ Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 11000 Beograd, 27. marta 80

²⁾ Vojnotehnički institut VJ, 11000 Beograd, Katanićeva 15

zone i površine diskontinuiteta. U opštem slučaju, ova slika važi za opstrujavanje zaobljenog tela sa centralnom iglom ako nema oscilacija. Odvajanjem graničnog sloja izazvanim pozitivnim gradijentom pritiska duž igle, formira se zona povratnog strujanja ili zona recirkulacije 1. Odvojeni granični sloj formira zonu spoljašnjeg poremećenog strujanja 2 izvan zone recirkulacije i u oblasti 3 ponovo se sjedinjuje sa opstrujavanom zaobljenom površinom tela. Spoljašnje ivice 8 zone 1 obrazuju površinu sličnu konusnoj, koja seče telo u vertikalnoj ravni simetrije u tačkama A i B. U ovoj oblasti pritisak je mnogo manji nego iza odvojenog udarnog talasa koji se formira pred istim telom ako nema igle. Kako je brzina strujanja u toj zoni mala, to je i prelaženje toplote iz vazduha na površinu tela manje. Samo u oblasti sjedinjenja graničnog sloja 3 dolazi do velikog porasta pritiska i toplotnog protoka, što je uslovljeno strujanjem gasa po karakteru sličnom onom koje nastaje u prednjoj zaustavnoj tački opstrujavanog tela bez igle. U oblasti ponovnog spajanja graničnog sloja 3, nadzvučna struja trpi nagli zaokret. Usled nagle promene pravca struje stvara se zakrivljeni udarni talas 6, koji se u tački C seče sa konusnim talasom 7, koji nastaje u prednjem delu igle. Što je ugao zakretanja struje u oblasti 3 veći, to je pored većeg otpora i zagrevanja (jer je talas 6 u tom slučaju jači), veća mogućnost pojave neželjenih oscilacija. Ovo je posebno izraženo kod tela koje ima ravnu prednju stranu upravnu na osu tela. Tada je u oblasti prisajedinjenja graničnog sloja 3 ugao skretanja struje veliki, $\approx 90^\circ$. Talas 6 je u tom slučaju vrlo snažan, pa je porast pritiska iza njega veliki. Ova visoka vrednost pritiska iza talasa izaziva ubacivanje dodatnog dela vazduha u recirkulacionu zonu, čime se njene dimenzije povećavaju i ciklus oscilovanja počinje. Zbog toga je jasno da se oscilacije mogu izbeći smanjenjem ugla skretanja struje u zoni 3, odnosno promenom prednje ravni u zakrivljenu površinu tela. Iza talasa 7, usled pozitivnog gradijenta pritiska duž igle, kako je već napomenuto, dolazi do odvajanja graničnog sloja. Kao rezultat međusobnog dejstva talasa 6 i 7 nastaje krivolinijski talas 5. Iza pomenuta tri talasa, a počev od tačkica C, obrazuje se tangencijalna smičuća površina 4.

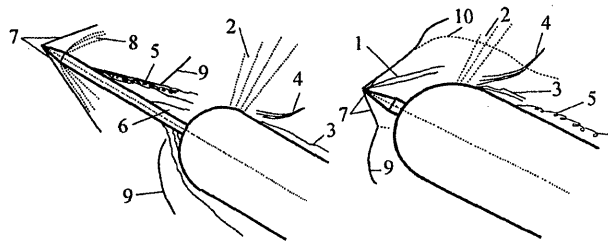


Slika 1. Strujna slika pri nadzvučnom osnosimetričnom opstrujavanju zaobljenog tela sa iglom

Kompletna strujna slika u opštem slučaju, osim od geometrijskih parametara opstrujavanog tela, zavisi i od vrednosti Mahovog i Reynoldsovog broja struje. Pri konstantnoj vrednosti ovih brojeva, variranjem oblika i dužine igle, mogu se dobiti različiti rezultati. Upotrebom kraće igle do odvajanja graničnog sloja dolazi na njenom vrhu, pa se takvo odvajanje naziva "odvajanje na vrhu" [3]. U slučaju dužih

igala ugrađenih u osi tela, tačka odvajanja se pomera od vrha igle nizvodno. Takvo odvajanje graničnog sloja naziva se "odloženo odvajanje".

Prilikom leta, vektor brzine projektila zauzima određen ugao u odnosu na osu tela. To je napadni ugao i ekvivalentan je uglu koji struja vazduha u aerotunelu zaklapa sa osom ispitivanog modela. U ovom slučaju razmatra se let projektila čiji napadni ugao nema velike vrednosti. Zbog toga se istraživanje ograničava na vrednosti napadnog ugla od -4° do 10° . Međutim, i pri ovako malim napadnim uglovima strujna slika se menja. Strujanje nije više osnosimetrično i značajno se povećava otpor, ali i uzgon. I u ovom slučaju značajnu ulogu igra dužina igle. Na strani tela izloženoj struji fluida zona odvajanja je manja, a na zaklonjenoj (zavetrinskoj) strani veća. Pri određenom napadnom uglu granični sloj se ne vraća na površinu tela. Ako je igla kraća (sl.2), tada u predelu spajanja zaobljenog prednjeg dela i tela projektila dolazi do ubrzanja struje kroz ekspanzioni talas na sl.2 označen brojem 2. Granični sloj u toj oblasti označen je brojem 3. Niz struju vazduha, sa iste strane, javlja se udarni talas 4, koji izaziva odvajanje graničnog sloja u obliku dva vrtloga 5 koji se obrću suprotnim smerovima, što se događa i pri opstrujavanju dugih obrtnih tela pod napadnim uglovima većim od 0° . Ako je igla ugrađena u osi tela duža, odvajanje graničnog sloja sa formiranjem vrtloga 5 dešava se ranije, u zoni igle. To, međutim, ne isključuje mogućnost odvajanja graničnog sloja 6 i neposredno ispred prednjeg dela tela.



Slika 2. Strujna slika pri nadzvučnom opstrujavanju obrtnog tela sa kraćom i dužom iglom pri napadnom uglu većem od 0°

Analitička rešenja za aerodinamički proračun zaobljenog obrtnog tela izloženog nadzvučnoj struji bez igle ili sa iglom ne postoje. Moguće je samo kombinacijom teorijskih, empirijskih i eksperimentalnih podataka odrediti vrednosti aerodinamičkih koeficijenata za tela jednostavne geometrije, bez igle. Takođe, na osnovu postojećih podataka iz literature, mogu se proceniti i njihove vrednosti sa iglom. Korišćenjem postojećih numeričkih programa i razvojem novih, znatno se smanjuju troškovi potrebni za izvođenje veoma skupih eksperimenata u ovoj oblasti. Ipak, potvrda numeričkog rešenja određene konfiguracije koja se izučava, može se dobiti samo eksperimentom najpre u aerotunelu, a zatim i u realnom letu.

Opis ispitno-merne opreme i eksperimenta

Eksperiment je realizovan u malom trisoničnom aerotunelu T-36. To je aerotunel prekidnog dejstva, vakuumskog tipa [9]. Aerotunel ima dva rezervoara, vakumski 485 m^3 , gde može da se postigne apsolutni pritisak od 50.0 mbar , i rezervoar suvog vazduha 820 m^3 . Aerotunel ima promenljive mlaznike tako da se u radnom delu postiže brzina izražena Mahovim brojevima od 0.2 do 1.2, 1.56, 1.86, 2.48 i 3.24. Radni deo je kvadratnog preseka (0.25×0.25) m i dužine 0.6 m. Zidovi radnog dela, gornja i donja ploča, mogu da budu kompaktni, glatki za podzvučne i nadzvučne brzine i porozni za ispitivanja u oblasti transsoničnih brzina.

Bočni zidovi imaju prozore kako bi se omogućila primena metode vizualizacije strujanja. Dužina rafala je do 60 s i zavisi od Mahovog broja. Reynoldsov broj je do $15 \cdot 10^6$.

Aerotunel je opremljen unutarnjim aerovagama tipa VTI, FFA, ABLE. Raspodela pritisaka se meri skanivalom. Za akviziciju podataka se koristi sistem NEFF 600. Akvizicija i kontrola je sa PDP 11/84, a obrada je na VAX-u 8250.

Ispitivani model projektila je cilindričnog oblika, prečnika 27 mm i dužine 120 mm. Zadnji kraj konusa ima konusno suženje, a prednji kraj poluloptasto zaobljenje na kome se nalazi odvajач udarnog talasa igla prečnika 4.5 mm i dužine 25 mm. Postoje pet varijanti igala istih dimenzija, a različitog oblika. Model se montira na monoblok aerovagu FFA I-667, prečnika 12 mm, i odgovarajući sting.

Osnovni delovi modela su trup i vrh modela izradjeni od durala, zavrtanj i podloška za učvršćivanje na aerovagu od čelika i pet varijanti igala od čelika.

Osnovna merna oprema korišćena u eksperimentu je primarni merni sistem (PMS). Zaustavni pritisak se meri preko pito sonde, apsolutnim davačem tipa IHTM opsega 1.75 bara. Merno mesto je u komori umirenja aerotunela. Razlika zaustavnog i statičkog pritiska u radnom delu se meri diferencijalnim davačem tipa IHTM, opsega 0.5 bara. Bazni pritisak na modelu se meri diferencijalnim davačem tipa PDCR42, opsega 0.35 bara. Zaustavna temperatura se meri RTD davačem u komori umirenja.

Sile i momenti se mere šestokomponentnom aerovagom FFA I-667. Veza aerovage i modela je ostvarena preko osmougaone zarubljene piramide. Specijalnim, veoma osetljivim potenciometrom se meri ugao propinjanja modela, na uređaju za promenu napadnog ugla.

Veoma efikasna metoda za optičku vizualizaciju strujanja je Schlieren metoda [8,9]. Metoda se koristi za stišljiva strujanja sa Mahovim brojem $M > 0.5$. Metoda je osetljiva na gradijente gustine fluida, koji se detektuju na osnovu uglovne defleksije poremećenog svetlosnog zraka u odnosu na neporemećeni zrak u polju gde postoje nehomogenosti. Ova metoda može da se koristi kako za stacionarna, tako i za nestacionarna strujanja.

Aparatura koja se koristi za realizaciju ove metode mora da zadovoljava veoma stroge kriterijume za kvalitet i podešenost. Zavisno od dimenzija, karaktera strujnog polja kao i od tipa očekivanih rezultata, postoje različite verzije opreme, odnosno metoda. Najjednostavnija je metoda koja koristi paralelni snop svetlosti.

Kao izvor svetlosti se koristi Na, Xe ili Hg lampa od nekoliko stotina kW. Ispred lampe se nalazi maska sa prorezom, pravougaonog oblika sa promenljivim dimenzijama u funkciji osetljivosti sistema. Pomoću sfernog (ili paraboličnog) ogledala snop se kolimira i kao strogo paralelan prolazi kroz radni deo aerotunela. Deo toga snopa ne menja svoj pravac, a deo snopa, koji je prošao kroz segmente polja sa promenljivom gustinom, skreće u pravcu povećanja gustine. Ugao skretanja je proporcionalan gradijentu gustine, odnosno gradijentu indeksa prelamanja svetlosti.

Kada prodje kroz radni deo aerotunela i pokupi informacije o nehomogenostima, snop se fokusira sa drugim ogledalom. U ravnini fokusa ovog ogledala se formiraju dva lika: jedan od deo snopa što nije promenio pravac, drugi od skrenutog snopa. U fokus ogledala se postavlja maska. Maska može da bude komponovana od dva dela, oštro razgraničena, jedan potpuno prozračan (koeficijent transmisije $T > 90\%$), a drugi neprozračan ($T = 0\%$). Lik koji padne na prozračni deo prolazi i stiže do ekrana, a lik ili likovi koji su u neprozračnom delu maske su blokirani. Na ekranu se vide tamna područja tamo gde je snop blokiran. Ova maska

je poznata kao Fukolov nož. Ako je maska sastavljena od višebojnih segmenata, onda se dobijaju efekti u boji.

Na osnovu geometrijskih karakteristika optičkih komponenta sistema (fokusne dužine, visine noža, ili dimenzije filtra u boji, udaljenost ekrana i dimenzije radnog dela aerotunela), može se odrediti ugao skretanja snopa svetlosti [9]. To je osnovni podatak za određivanje gradijenta gustine. Zavisno od visine noža u odnosu na optičku osu Schlieren sistema i aerotunela, ili od širine obojenih segmenata, može da se menja osetljivost sistema (do 10^{-5} kg/m^4 za konfiguraciju korišćenu u ovom eksperimentu). Ako se menja orijentacija noža, menja se pravac gradijenta koji se detektuje, jer se ovom metodom registruju gradijenti normalni na rub noža, odnosno filtra.

Schlieren efekti mogu da se snimaju fotoaparatom, TV ili filmskom kamerom. Koriste se analogne ili digitalne kamere. Veoma brze promene se snimaju brzim kamerama (do 10^5 slika/s) [9].

Analiza rezultata

Eksperimentalna analiza vršena je za model bez igle i sa iglom, čije su geometrijske karakteristike date u prethodnom delu rada. Aerodinamički koeficijenti računati su pri Mahovom broju neporemećene struje $M \approx 1.9$, Reynoldsovom broju $Re = 0.38 \times 10^6$ i svim napadnim uglovima $\alpha \in [-4^\circ, 10^\circ]$ sa korakom $\approx 2^\circ$. Model (telo) i igla opstrujavani u tunelu T-36 napravljeni su od čelika Č. 4171 kvaliteta površine N9.

U toku eksperimenata izvršene su dve grupe merenja. Određene su vrednosti aerodinamičkih koeficijenata otpora c_d i uzgona c_l za telo bez igle i sa iglom. Pomoću Schlieren metode izvršena je vizualizacija strujnog polja vazduha oko modela.

Vrednosti aerodinamičkih koeficijenata

Prilikom izvođenja eksperimenata u aerotunelu T-36 pomoću aerovage merene su komponente glavnog vektora i glavnog momenta spoljašnjeg opterećenja koje trpe ispitivani modeli u radnom delu. Pomoću davača pritiska i temperature izmerene su totalne vrednosti pritiska i temperature u komori umirenja, kao i vrednost statičkog pritiska u radnom delu i u jednoj tački na držaču modela u blizini baze. Vrednosti dinamičkog pritiska, Mahovog i Reynoldsovog broja, brzine strujanja i gustine u neporemećenoj struji izračunate su na osnovu merenih veličina.

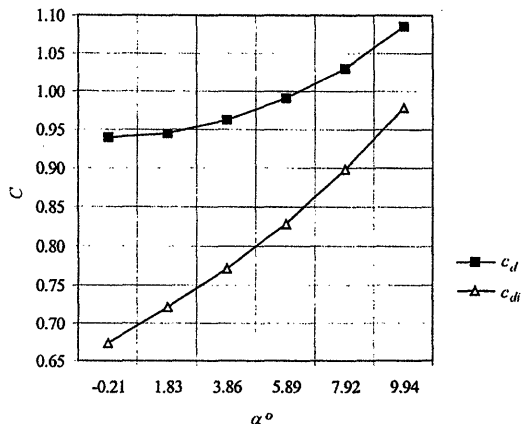
Izmerene i izračunate srednje vrednosti strujnih parametar koje se odnose na neporemećenu struju u toku svih duvanja su približno iste: $p_0 = 0.992 \text{ bar}$, $p = 0.151 \text{ bar}$, $T_0 = 278.1 \text{ K}$, $q = 0.376 \text{ bar}$, $v = 482.1 \text{ m/s}$, $q = 0.324 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.1097 \times 10^{-6} \text{ Pas}$, $Re_d = 38 \times 10^6$, $M = 1.887$ i $T = 162 \text{ K}$.

Odgovarajući aerodinamički koeficijenti dobijeni su deljenjem odgovarajuće komponente sile ili momenta sa dinamičkim pritiskom, referentnom površinom i referentnom dužinom. Za referentni pritisak usvojen je dinamički pritisak neporemećene struje q , a za referentnu površinu – površina kruga A prečnika cilindričnog dela modela d , dok je referentna dužina – prečnik d .

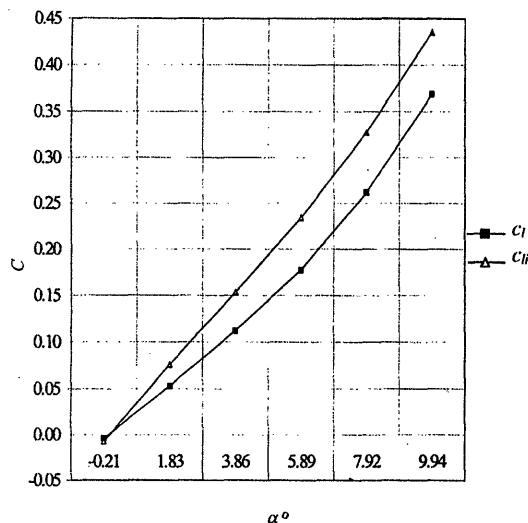
$$C_D = D_q S_{ref} \quad C_L = L_q S_{ref} \quad (1)$$

Na graficima prikazanim na slikama 3 i 4 date su zavisnosti aerodinamičkih koeficijenata otpora c_d i uzgona c_l od napadnog ugla α za ispitivane konfiguracije. Priroda svih krivih je očekivana. Koeficijenti otpora i uzgona rastu sa

porastom napadnog ugla. Na ovim graficima prikazana je promena vrednosti koeficijenta otpora i uzgona koja se postiže ugradnjom igle. Pokazuje se da je koeficijent otpora za sve vrednosti napadnog ugla značajno manji kod modela sa iglom konusnog vrha u poređenju sa konfiguracijom bez igle. Isto tako, ugradnjom igle postiže se porast koeficijenta uzgona u potpunom opsegu napadnih uglova pri kojima je vršeno ispitivanje.



Slika 3. Zavisnost koeficijenta aerodinamičkog otpora od napadnog ugla α za model bez igle c_d i sa iglom konusnog vrha c_{dH}



Slika 4. Zavisnost koeficijenta aerodinamičkog uzgona c_l od napadnog ugla α za model bez igle c_l i sa iglom konusnog vrha c_{lH}

U tabeli 1 dato je relativno smanjenje vrednosti aerodinamičkog koeficijenta otpora kod konfiguracije sa iglom u odnosu na konfiguraciju bez igle, pri svim napadnim uglovima. Relativno smanjenje koeficijenta otpora Δc_d za telo sa iglom konusnog vrha u odnosu na telo bez igle računato je po formuli:

$$\Delta c_d = \frac{|c_d - c_{dH}|}{c_d} \cdot 100[\%] \quad (2)$$

Tabela 1. Relativno smanjenje koeficijenta otpora Δc_d za telo sa iglom konusnog vrha u odnosu na telo bez igle, pri Mahovom broju $M=1.9$ i različitim vrednostima napadnog ugla α

M	α°	c_d	c_{dH}	Δc_d [%]
1.9	-0.21	0.9396	0.6736	28.31
1.9	1.83	0.9446	0.7212	23.66
1.9	3.86	0.9623	0.7721	19.77
1.9	5.89	0.9908	0.8286	16.38
1.9	7.92	1.0307	0.8988	12.79
1.9	9.93	1.0855	0.9780	9.91

Pokazuje se da pri nultom napadnom uglu koeficijent otpora kod tela sa iglom opada u odnosu na telo bez igle $\approx 28\%$. Povećanjem napadnog ugla opada relativno smanjenje koeficijenta otpora Δc_d , tako da pri najvećem napadnom uglu $\alpha \approx 10^\circ$ iznosi $\approx 10\%$.

Relativno povećanje koeficijenta uzgona Δc_l dato u tabeli 2, za telo sa iglom konusnog vrha u odnosu na telo bez igle računato je po formuli:

$$\Delta c_l = \frac{|c_{lH} - c_l|}{c_l} \cdot 100[\%] \quad (3)$$

Tabela 2. Relativno povećanje koeficijenta uzgona Δc_l za telo sa iglom konusnog vrha u odnosu na telo bez igle, pri Mahovom broju $M=1.9$ i različitim vrednostima napadnog ugla α

M	α°	c_l	c_{lH}	Δc_l [%]
1.9	1.83	0.0534	0.0761	42.69
1.9	3.86	0.1120	0.1536	37.21
1.9	5.89	0.1778	0.2344	31.83
1.9	7.92	0.2618	0.3274	25.05
1.9	9.93	0.3687	0.4350	18.00

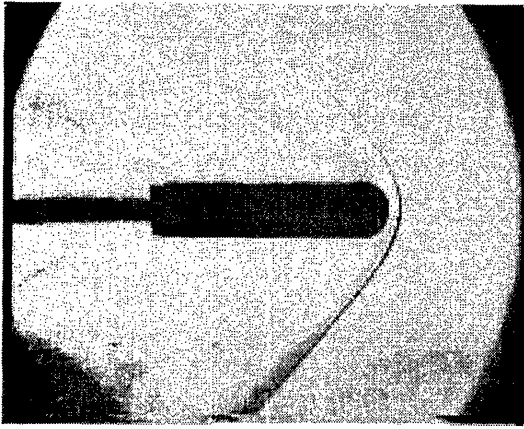
Pokazuje se da pri napadnom uglu $\alpha \approx 2^\circ$ koeficijent uzgona kod tela sa iglom raste u odnosu na telo bez igle približno 43%. Povećanjem napadnog ugla opada relativno povećanje koeficijenta uzgona Δc_l , tako da pri najvećem napadnom uglu $\alpha \approx 10^\circ$ iznosi približno 18%.

Otpor modela sa iglom manji je zbog toga što se ispred igle stvara konusni udarni talas (sl.1) koji sa udarnim talasom ispred modela obezbeđuje manji porast pritiska u poređenju sa onim koji nastaje pri prolasku kroz snažan odvojeni udarni talas koji se formira ispred tela bez igle. Kao posledica te činjenice postiže se smanjenje otpora ugradnjom igle. Ovo će biti potvrđeno u sledećem poglavlju analizom snimaka dobijenih Schlieren metodom.

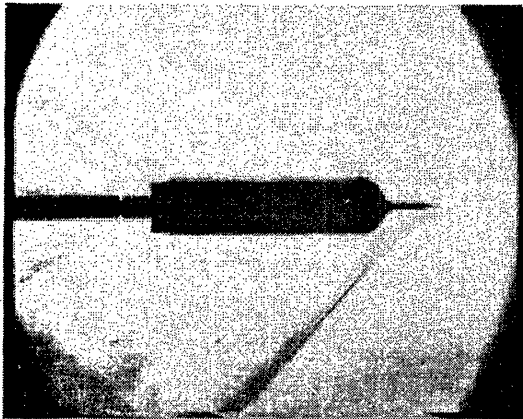
Rezultati dobijeni Schlieren metodom

Pre početka merenja, kada nema strujanja vazduha kroz aerotunel, u radnom delu je homogeno polje gustine, tako da nema ni skretanja svetlosti pri prolasku kroz radni deo. U tom slučaju lik pukotine dobija se na centralnom delu filtra, a slika strujnog polja na ekranu ili fotografskom snimku je zelene boje. Plava, zelena i crvena pruga na filtru u toku eksperimenta bile su postavljene jedna iznad druge, pa su na taj način registrovane samo promene gustine po vertikalnoj osi. Prilikom eksperimenta sa modelom bez igle i sa iglom nisu registrovane oscilacije strujne slike. Ova činjenica se slaže sa rezultatima radova većeg broja autora [3] da pri opstrujavanju tela polusfernog vrha sa iglom nema oscilacija strujne slike.

Na slikama 5 i 6 su prikazani Schlieren snimci za model bez igle i sa iglom. To su Schlieren fotografije modela opstrujanih strujom vazduha Mahovog broja $M=1.89$, Reynoldsovog broja $Re=0.38 \times 10^6$, pod nultim napadnim uglom. Da bi se povećala osetljivost filtera je postavljen tako da se gornja ivica pukotine poklapa sa prelazom zelene u crvenu oblast. Zbog toga su i pri nultom napadnom uglu dobijeni asimetrični snimci. Kako se zbog horizontalno postavljenih pruga filtra registruju promene gustine vazduha u radnom delu u vertikalnom pravcu, to su na donjoj polovini snimka udarni talasi označeni crvenom, a ekspanzioni plavom bojom, dok je na delu slike iznad ose obratno.



Slika 5. Strujna slika dobijena Schlieren metodom za model bez igle pod nulnim napadnim uglom



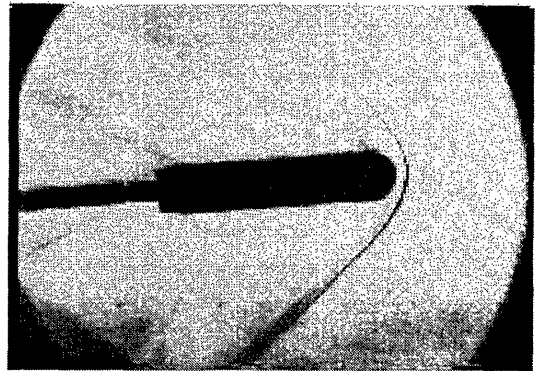
Slika 6. Strujna slika dobijena Schlieren metodom za model sa iglom pod nulnim napadnim uglom

Rastojanje vrha udarnog talasa od prednje zaustavne tačke tela bez igle (sl.5) je na približno $0.19d$ u njegovoj osi, gde je talas najvećeg intenziteta. Udaljenjem od tela talas slabi i ugao nagiba β se smanjuje. Na rastojanju od ose većem od jednog prečnika modela d , talas je skoro konusna površina čije izvodnice sa horizontalom obrazuju ugao od približno 45° . Ovaj ugao se ne menja u oblasti obuhvaćenoj snimkom. Iza udarnog talasa može se uočiti ekspanzioni talas oivičen Mahovim linijama ugla nagiba od 55° do $50,5^\circ$. Na konusnom delu modela javlja se još jedan ekspanzioni talas sa lepezom Mahovih linija, čiji su uglovi od približno 44° do 35° .

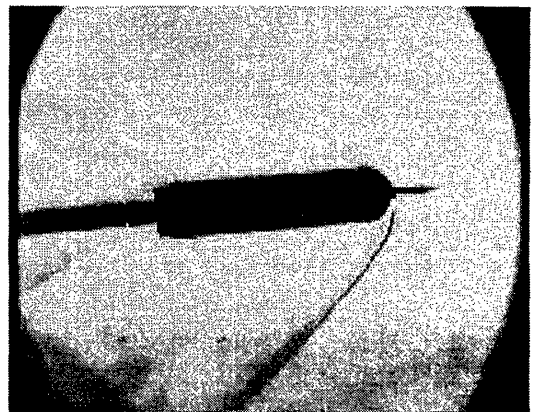
Na sl.6 moguće je uočiti izmene karaktera strujanja izazvane iglom u prednjem delu strujnog polja (oblast oko igle i prednjeg dela tela). Najpre, od vrha igle formira se udarni talas iza koga dolazi do odvajanja graničnog sloja. Usled ovog odvajanja formira se recirkulaciona oblast približno konusnog oblika. U oblasti ponovnog spajanja graničnog sloja vazдушna struja trpi nagli zaokret. Zbog toga se neposredno ispred prednjeg dela tela, pomeren od ose, formira odvojeni udarni talas. Međudejstvom ovog talasa i talasa koji kreće od prednjeg dela igle na određenom rastojanju od ose formira se treći udarni talas, čija je površina približno konusnog oblika. Strujanje u preostalom delu strujnog polja ne menja se u odnosu na telo bez igle. Strujna slika koja se javlja prilikom opstrujavanja modela sa iglom pri nulnom napadnom uglu data na Schlieren snimku, prikazanom na sl.6, poklapa se sa skicom strujne slike datom na sl.1. Kod tela sa iglom dobija se ugao konusnog talasa $\beta \approx 39^\circ$. Polugao γ konusnog vrha zone povratnog strujanja je nešto manji od 20° . U poređenju sa konusnim udarnim talasom

nastalim opstrujavanjem konusa polougla jednakog uglu γ nadzvučnom strujom vazduha Mahovog broja $M \approx 1.9$, izmerene vrednosti ugla β se poklapaju [6]. Mesto spoja konusnog udarnog talasa, koji izaziva igla sa talasom nastalim ispred modela u zoni ponovnog spajanja graničnog sloja, je kružnica poluprečnika $\approx 1.1d$.

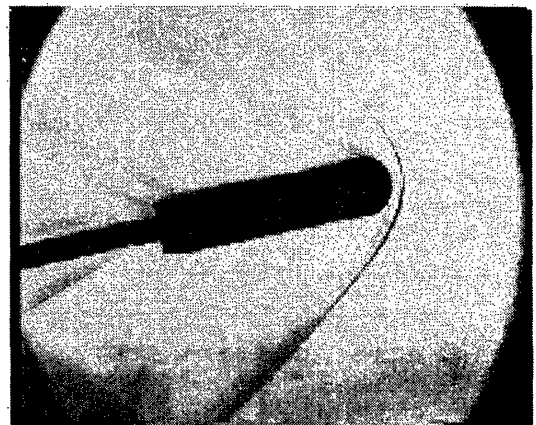
Na slikama 7 i 8 su dati Schlieren snimci konfiguracija bez igle i sa iglom konusnog vrha opstrujanih pod napadnim uglom $\alpha \approx 10^\circ$, a na slikama 9 i 10 snimci dobijeni za ove modele pod maksimalnim napadnim uglom $\alpha \approx 10^\circ$. Mesto spoja udarnog talasa, koji izaziva igla sa talasom nastalim ispred modela, pomera se promenom vrednosti napadnog ugla. U vertikalnoj ravni simetrije modela ovo mesto spoja ispod ose nalazi se na rastojanju od ose od $\approx 1.1d$ do $\approx 0.5d$, kada napadni ugao menja vrednosti od 0° (sl.6) do 10° (sl.10).



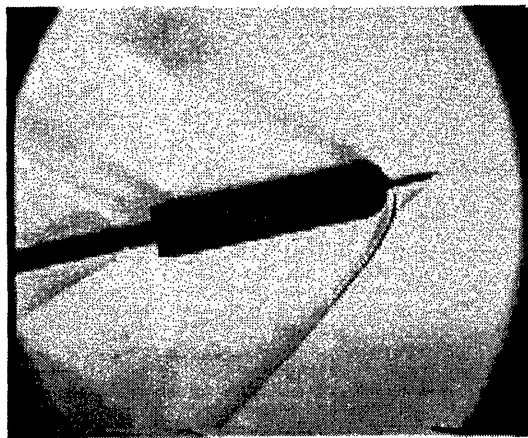
Slika 7. Strujna slika dobijena Schlieren metodom za model bez igle pod napadnim uglom $\alpha \approx 4^\circ$



Slika 8. Strujna slika dobijena Schlieren metodom za model sa iglom pod napadnim uglom $\alpha \approx 4^\circ$



Slika 9. Strujna slika dobijena Schlieren metodom za model bez igle pod najvećim napadnim uglom $\alpha \approx 10^\circ$



Slika 10. Strujna slika dobijena Schlieren metodom za model sa iglom pod najvećim napadnim uglom $\alpha \approx 10^\circ$

Na osnovu prikazanih Schlieren fotografija može se zaključiti da igla konusnog vrha, dužine $l=1d$, ugrađena ispred tela polusfernog vrha izloženog nadzvučnoj struji vazduha, izaziva promene u karakteru strujanja u oblasti oko prednjeg dela tela. Igla na taj način, koristeći pozitivan efekat odvajanja graničnog sloja, pri svim napadnim uglovima, obezbeđuje značajno poboljšanje aerodinamičkih karakteristika rakete.

Zaključak

Razmatran je uticaj igle na strujno polje zaobljenog obrtnog tela pri nadzvučnom opstrujavanju strujom vazduha Mahovog broja $M_\infty \approx 1.9$. Posebno je pokazano da igla izaziva odvajanje graničnog sloja, koje se može izbeći u velikom broju slučajeva u tehničkoj praksi. U ovom slučaju odvajanje graničnog sloja ima pozitivan efekat. Vršena je analiza opstrujavanja tela bez igle i sa iglom dužine jednake prečniku. U slučaju svih ispitivanih konfiguracija ugao između ose tela i supersonične struje vazduha variran je u intervalu $\alpha \in [-4^\circ, 10^\circ]$ sa korakom 2° .

Na osnovu eksperimentalne analize zaključeno je da se ugradnjom igle, cilindričnog oblika konusnog vrha dužine jednake kalibru rakete, postižu značajna poboljšanja aero-

dinamičkih karakteristika rakete polusfernog vrha. Kada napadni ugao α menja vrednosti od 0° do 10° , igla smanjuje koeficijent otpora modela od 28% do 10%. Koeficijent uzgona modela povećava se ugradnjom igle od 43% do 18% kada napadni ugao α dobija vrednosti od 2° do 10° .

Eksperimentalna ispitivanja su potvrdila da je veoma značajno vršiti vizualizaciju strujanja oko modela sa komplikovanom geometrijom. Schlieren metoda je omogućila da se "vide" karakteristična područja strujne slike i da se oceni uticaj igle na aerodinamičke karakteristike rakete.

Dalja istraživanja u ovoj oblasti su usmerena na ispitivanje uticaja oblika i dužine igle na aerodinamičke karakteristike rakete, kao i uvođenje holografske interferometrije, kao metode vizualizacije strujanja.

Literatura

- [1] ANDERSON, J.D. *Fundamentals of Aerodynamics*, McGraw-Hill, Inc.
- [2] BOGDONOFF, S.M., VAS, I.E. Preliminary Investigations of Spiked Bodies at Hypersonic Speeds. *J. Aero/Space Sciences*, February 1959, vol.26, no.2, p.65-74.
- [3] CHANG, P.K. *Separation of Flow*. Pergamon Press, 1970.
- [4] ČURČIN, M. *Gradijenti aerodinamičkih koeficijenata (GAK)*, int.dok. Vojnotehnički institut Vojske Jugoslavije, Beograd, 1996.
- [5] ĐORĐEVIĆ, V.D. *Dinamika jednodimenzijskih strujanja fluida*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd 1995.
- [6] *...Equations, Tables, and Charts for Compressible Flow*, by Ames Research Staff, National Advisory Comitee for Aeronautics, Report 1135.
- [7] MAIR, W.A. Experiments on Separation of Boundary Layers on Probes in Front of Blunt-Nosed Bodies in a Supersonic Air Stream. *Phil. Mag.*, Ser. 7, July 1952, vol.43, no.342, p.695-716.
- [8] MARZKIRICH, W. *Flow visualization*. Academic Press, New York, 1977.
- [9] RISTIĆ, S. Metod za povećavanje osetljivosti i rezolucije Schlieren sistema u boji. *Naučnotehnički pregled*, 1987, vol.XXXVII, no.1, p.3-8.
- [10] SCHLICHTING, H. *Boundary Layer Theory*, Pergamon Press, 1955.
- [11] Krasnov, N.F., Koševoj, V.N. *Upravljenie i stabilizacija v aerodinamike*. Visšaja škola, Moskva, 1978.

Rad primljen: 11.11.1999.god.