

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik **19** (1991/1992)

Številka 6

Strani 346–351

Janez Strnad:

LETALSKI POK

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/19/1101-Strnad.pdf>

© 1992 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA – založništvo

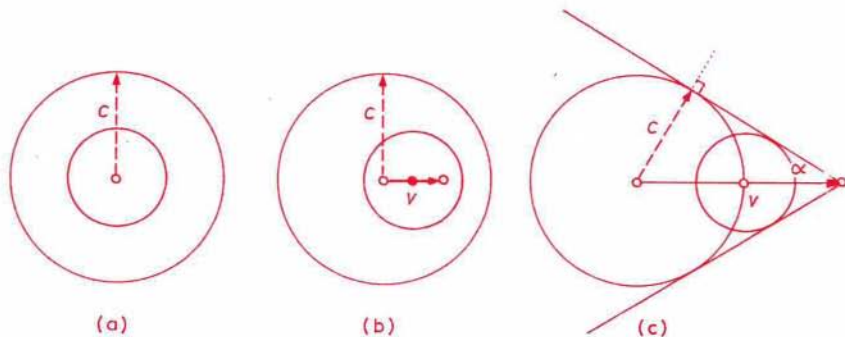
Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

LETALSKI POK

Kako je s *pokom*, ki ga povzroči letalo? Vprašanje se je pojavilo, ko je vojna zajela naše kraje. Poskusimo osvetliti zanimivi pojav, ne da bi se spuščali v podrobnosti.

Po zraku ali drugem plinu potujejo *motnje*. Hitro premaknimo telo. Okolni zrak se odzove tako, da izpolni del prostora, ki ga je zapustilo telo, in se umakne iz dela, kamor se je premaknilo. Na eni strani se pojavi *razredčina*, v kateri je tlak nižji od prejšnjega, in na drugi *zgoščina*, v kateri je višji. Motnja je *vzdolžna* ali *longitudinalna*, ker se deli zraka gibljejo v smeri potovanja motnje in v nasprotni smeri. Najbolj znana motnja je *zvok*, ki nastane, če telo, na primer opna v zvočniku ali glasilki v grlu, sinusno niha. Zvok slišimo, če leži frekvenca med 16 in 16 tisoč do 20 tisoč nihajev na sekundo. V zvoku si sledijo v enakomernih razmikih razredčine in zgoščine, ki potujejo s *hitrostjo zvoka*. Pri navadni temperaturi meri v zraku hitrost okoli 340 metrov na sekundo ali 1200 kilometrov na uro. Na večji višini je zaradi nižje temperature hitrost zvoka manjša. Na višini okoli 11 tisoč metrov doseže nekaj manj kot 300 metrov na sekundo in se nato do višine več kot 20 tisoč metrov znatno ne spremeni.

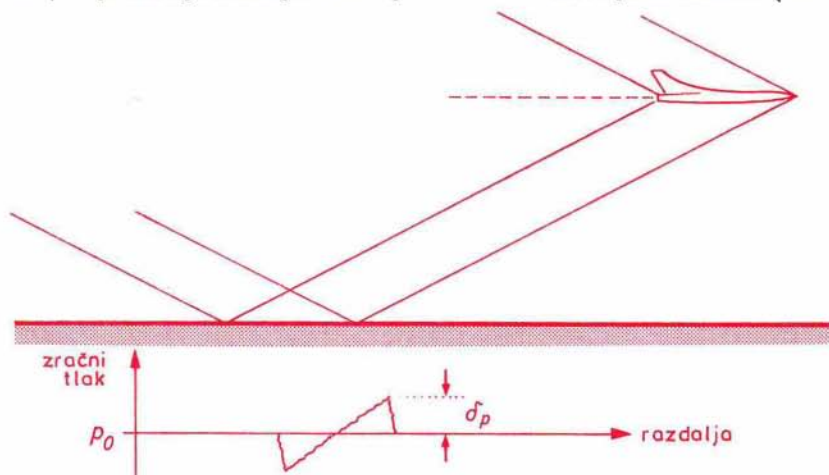
V zvoku je tlak v zgoščini samo malo višji od navadnega zračnega tlaka, v skrajnem primeru za kako desetstisočino navadnega zračnega tlaka, in tlak v razredčini samo malo nižji. Drugače je, če se v delu zraka pojavi tlak, ki je mnogo višji od navadnega zračnega tlaka, na primer pri močni eksploziji ali blisku. V tem primeru potuje po zraku motnja kot *udarni val*. Na eni strani



Slika 1. Potovanje motnje od telesa, ki miruje ($v = 0$) ali se giblje zelo počasi ($v \ll c$) v zraku (a), se giblje s hitrostjo $v = \frac{3}{5}c$ (b) in se giblje s hitrostjo $v = 2c$ (c). Pot telesa je simetrijska os.

meje zrak še miruje pri navadnem tlaku in ima navadno gostoto, na drugi strani pa se giblje pri povišanem tlaku in ima povečano gostoto. Meja med obema območjema je udarni val, ki potuje po zraku z *nadzvočno hitrostjo*, to je s hitrostjo, večjo od 340 metrov na sekundo. V udarnem valu tlak z oddaljenostjo od kraja eksplozije pojema in kmalu toliko pade, da motnja potuje naprej kot zvok in ne več kot udarni val. Do takih pojavov pride tudi pri telesih, ki se gibljejo po zraku z nadzvočno hitrostjo. To velja na primer za krajišče vrvice pri biču, s katerim spretno zamahnemo. Do zelo zanimivih pojavov pride, ko se vesoljska postaja vrača na zemljo in vstopi z zelo veliko hitrostjo v ozračje. Tedaj nastane izrazit udarni val in jo spremlja, dokler se njena hitrost ne zmanjša. Pri tem se zrak na drugi strani meje tudi močno segreje.

Od telesa, ki miruje ali se giblje z zelo majhno hitrostjo, potuje motnja na vse strani z enako hitrostjo. V določenem trenutku doseže kroglo, v središču katere je telo. Pri telesu, ki se giblje z znatno hitrostjo, je treba upoštevati, da se njegova lega spreminja in se s tem premika središče krogle, iz katerega izhaja motnja. Pri telesu, ki se giblje z nadzvočno hitrostjo v , pa daleč od telesa potuje motnja z manjšo hitrostjo zvoka c in zaostaja za telesom (slika



Slika 2. Valovni čeli, ki izvirata iz nosu in repa nadzvočnega letala v vodoravnem letu s konstantno nadzvočno hitrostjo ($v = 2c$). Valovni čeli se s to hitrostjo gibljeta po vodoravnih tleh in se na njih odbijeta. Ker je hitrost v nižjih plasteh ozračja večja, sta valovni čeli ukrivljeni, če leti letalo dovolj visoko. V določenem trenutku je zaradi valovnih čel tlak na tleh odvisen od kraja. p_0 je nemoten zračni tlak, δp pa največje povečanje tlaka.

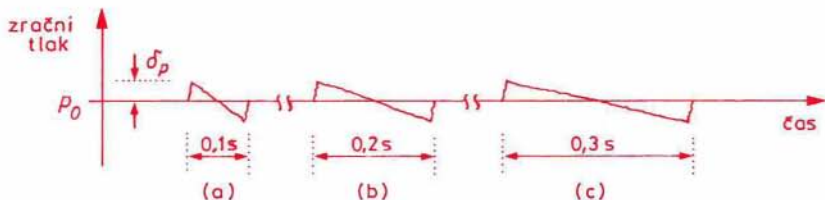
1). Motnja ima obliko plašča stožca, v vrhu katerega je hitro se gibajoče telo. Telo in plašč stožca potujeta v smeri osi stožca z nadzvočno hitrostjo v , plašč pa pravokotno na svojo smer s hitrostjo zvoka c . Polovičnega kota ob vrhu značilnega preseka α , to je kota med hitrostjo telesa in motnjo, ni težko izračunati:

$$\sin \alpha = c/v.$$

Motnja potuje v smeri, ki je pravokotna nanjo. Enačba potrjuje misel, da opazimo pojav le, če je telo hitrejše od zvoka, saj sinus kota ne more biti večji od 1. Kot je tem manjši in stožec tem bolj oster, čim večja je hitrost telesa. Motnjo, ki daleč od telesa potuje po zraku z zvočno hitrostjo, pravimo *valovno čelo*.

Valovno čelo ste zagotovo videli, le da ne v zraku, ampak na vodni gladini. Ladja, ki pluje po njej hitreje, kot potujejo vodni valovi, "vleče" za seboj trikotno območje z valovi, medtem ko je na drugi strani čela gladina še nemotena. Velja kar prejšnja enačba, misliti si moramo le, da smo plašč stožca presekali z ravnino, ki ustreza gladini vode. Motnja v tem primeru ni longitudinalna, ker se gibljejo deli vode tudi pravokotno na smer potovanja motnje.

Prvi je udarne valove in valovna čela v zraku opazil in raziskal avstrijski fizik Ernst Mach v Pragi v letih od 1875 do 1893. Delal je poskuse z motnjo, ki jo je sprožila v zraku električna iskra, torej droben blisk. Ugotovil je, da hitrost motnje blizu iskrišča preseže hitrost zvoka in da hitrost pojema z oddaljenostjo od iskrišča, dokler ne doseže hitrosti zvoka. Tako se je prvič srečal z udarnim valom, ki ga je napovedal malo pred tem matematik Bernhard Riemann. Po letu 1884 je začel Mach poskuse z izstrelki. Iz Prage v Pulj je na avstro-ogrsko mornariško akademijo pošiljal navodila za poskuse, vračali pa so mu poročila o poskusih. Leta 1886 je zapisal enačbo za kot α . Pozneje

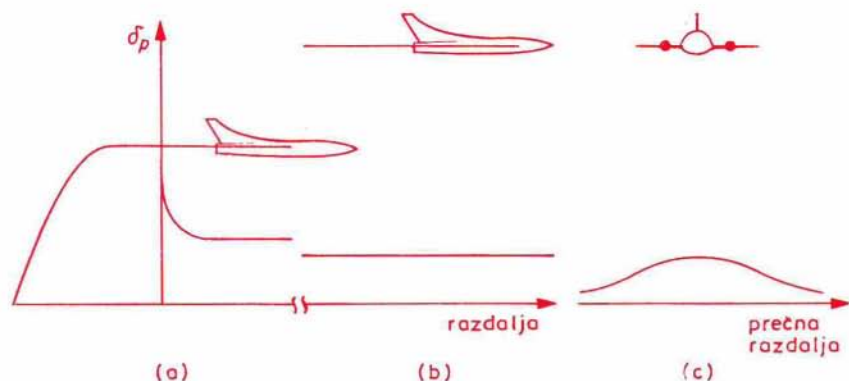


Slika 3. Značilni časovni potek spremembe tlaka, ki jo pri letu s svojo običajno hitrostjo povzročijo tri ameriška vojaška letala: lovec F-104 (a), bombnik B-58 (b) in večji bombnik XB-70 (c). Pojav traja po vrsti 0,1, 0,2 in 0,3 sekunde.

je delal poskuse z ovirami, ki so mirovale v toku zraka z nadzvočno hitrostjo. Dandanes njemu na čast govorimo o *Machovem valovnem čelu* in imenujemo razmerje med hitrostjo telesa in hitrostjo zvoka v plinu *Machovo število*.

E.Mach je opazil, da spremljata izstrelek, ki leti z nadzvočno hitrostjo, dve stožčasti valovni čeli; eno izvira iz prvega in drugo iz drugega krajišča. Podobno tudi letalo, ki leti z nadzvočno hitrostjo, spremljata valovni čeli, eno izvira iz nosu in drugo iz repa (slika 2). Tako je - strogo vzeto - le pri valjastem telesu. Izstrelek in letalski trup pa sta na sredi izbočena, zato nastane še nekaj vmesnih manj izrazitih valovnih čel, ki z naraščajočo razdaljo od telesa izginejo. Pri letalu motijo poleg tega še krila in drugi deli, ki pokvarijo njegovo osno simetrijo. Zaradi tega je slika valovnih čel v podrobnostih dokaj nepregledna.

Omejimo se le na valovni čeli na nosu in repu. Dovolj daleč od letala daje to dovolj dober okviren pregled. Pri vodoravnem letu nadzvočnega letala se valovni čeli gibljeta po tleh s hitrostjo letala in povzročita na določenem kraju značilno tlačno spremembo. Tlak hitro naraste, ko gre mimo prvo valovno čelo, nato tlak počasi pojema in zopet hitro naraste, ko gre mimo drugo valovno čelo. Odvisnost tlaka od časa kaže obliko črke N. Časovni razmik med povečanjema tlaka je odvisen od hitrosti letala in od njegove dolžine (slika 3). Pri kratkih letalih uho sploh ne loči dveh valovnih čel. Razliko med najvišjim in nemotenim tlakom δp ocenimo z nekaj tisočinami navadnega zračnega tlaka. Odvisna je od višine in oddaljenosti letala in je povečana na začetku poleta, ko letalo doseže in preseže zvočno hitrost (slika 4). Slikovito

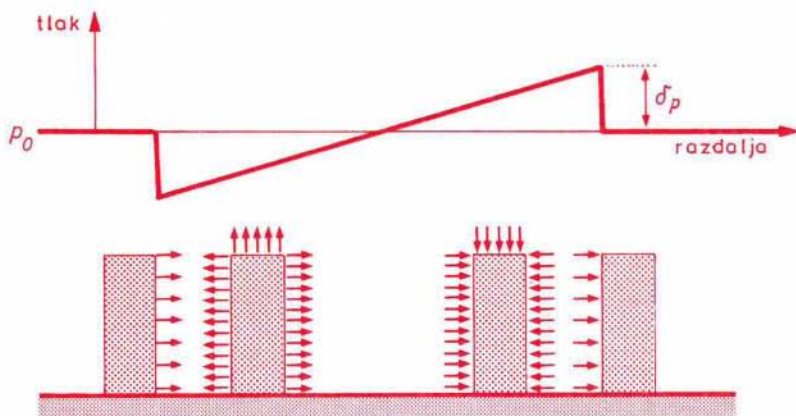


Slika 4. Povečanje tlaka δp je največje, ko letalo prebije zvočni zid (a), je tem manjše, čim višje leti letalo (b) in pojema tudi z razdaljo od točke pod letalom (c).

pravimo, da letalo tedaj *prebije zvočni zid*. Ime izvira iz izrazitega povečanja upora, ko se hitrost letala bliža zvočni hitrosti. Zaradi sil, ki jih povzročijo povečani ali zmanjšani tlak, lahko popokajo šipe, če leti letalo z nadzvočno hitrostjo dovolj blizu, posebno, ko prebije zvočni zid (slika 5). Ponavljajoči se preleti lahko celo poškodujejo občutljive dele stavb.

Nadzvočno letalo mora zaradi velikega upora imeti močne motorje. Batni motorji, ki poganjajo vijake, niso dovolj močni. Zvočni zid so prvič prebili po drugi svetovni vojni piloti, ki so se dvignili s takim letalom na veliko višino in ga potem usmerili navpično navzdol. V vodorovnem letu je prvič prebilo zvočni zid letalo X-1 iz Bellovih tovarn v ZDA leta 1947. Letalo je nosilo s seboj gorivo in oksidacijsko snov, tako da je raketni motor deloval le kratek čas. Dandanes vojaška letala z reakcijskimi motorji, ki zajemajo zrak iz okolja, dosegajo trojno zvočno hitrost, v posebnih primerih tudi večjo. Rakete za vesoljske polete jih pri tem še prekašajo. Doslej so izdelali tudi potniško nadzvočno letalo - angleško-francosko Concorde. Letala te vrste letijo od leta 1976, druge podobne načrte pa so opustili.

Glavni razlog je v tem, da nadzvočna potniška letala niso gospodarna. Poleg tega smejo leteti z nadzvočno hitrostjo le nad nenaseljenim ozemljem in nad morjem. Vojaška letala, ki vzletajo zaradi vaj, so večinoma tudi preganljiva. Vpliv pokov so prav zaradi potniških letal podrobneje raziskali. Ta letala bi prebila zvočni zid v višini nad 10 tisoč metrov, tako da bi valovni čeli



Slika 5. Sile zaradi valovnih čel v določenem trenutku v odvisnosti od kraja. Zaradi njih lahko popokajo šipe in so poškodovani občutljivi deli stavb, če leti letalo dovolj nizko, posebno, če prebije pri tem zvočni zid.

dosegli tla več deset kilometrov za letalom. Pas, na katerem bi slišali pok, bi bil širok več kot petdeset kilometrov. Nepričakovani poki, ki spominjajo na običajne eksplozije, so sicer neprijetni, a se večina ljudi nanje navadi. Samo pri posameznikih se razvije preobčutljivost. Jakost zvoka je tem večja, čim večja je razlika tlakov δp . V zvoku so zastopane vse frekvence s širokega frekvenčnega pasu, kot v vsakem šumu. Čim daljše je letalo, tem višje frekvence so zastopane najizdatneje. V poku potniškega letala so najizdatneje zastopane frekvence med deset in sto nihaji na sekundo. Za šipe in stavbe ni v tem primeru nobene nevarnosti, ker povzroči pok tolikšne pospeške kot druge dejavnosti v stanovanju, na primer loputanje z vrati ali poskakovanje.

Zaradi vsega tega in tudi zaradi izpušnih plinov, ki bi onesnažili visoke plasti ozračja, nadzvočna potniška letala nimajo obetavne prihodnosti. Zaradi spremenjenih svetovnih razmer tudi vojaška nadzvočna letala izgubljajo svojo pomembnost. Zato upajmo, da se nam jih nikoli več ne bo treba bati.

Janez Strnad

