

Különleges hangrobbanások

A „hangrobbanás” kifejezést a mindennapi életben több különböző jelenségre használjuk. Az ember hangrobbanás-ként élheti meg a felette alacsonyan elszivítő repülőgép hirtelen felerősödő, majd elhalkuló hangját, a közelben becsapódó villám hangját, vagy egy valódi robbanás kiváltotta hangot. A fizikusok azonban ezt a kifejezést szűkebb értelemben használják: a hangsebességgel, vagy annál gyorsabban repülő gép által keltett nyomáshullám hatását nevezik hangrobbanásnak. Azt a hatást, amit ez a lökéshullám kelt a földi észleléskor. Fontos tudni, hogy a hangrobbanást nem a gép pilótája, hanem a földön álló megfigyelő érzékeli. Ugyanúgy, ahogy a hajó keltette lökéshullámokat se a hajó kapitánya, hanem a közelben evező csónakos érzékeli, amikor majdnem felborul a csónakja tőle.

A **P. 4383.** feladat megoldásában (Lapunk 238. oldalán) azt az alapesetet vizsgáltuk, amikor a gép vízszintesen, egyenes pályán, állandó sebességgel repül. Láttuk, hogy a hangrobbanást okozó Mach-kúp ilyenkor repülőgép sebességével halad át a megfigyelő helyén. De mi a helyzet akkor, ha a gép nem egyenes pályán halad, vagy ha változik közben a sebessége? Erre látunk a következőben két tanulságos példát.

Függőleges síkú, fokozatosan süllyedő repülés

Tegyük fel, hogy egy repülőgép H magasságban, vízszintesen repül, mondjuk kétszeres hangsebességgel ($v = 2c$). A Mach-kúp félnyílásszöge ilyenkor 30° , mivel $\sin 30^\circ = \frac{c}{v} = \frac{1}{2}$. Ekkora szöget zár be a lökéshullám hullámfrontja a gép haladási irányával. A hullám terjedési iránya ugyanakkor 60° -ot zár be ugyanezzel. Amit a megfigyelő lökéshullámként érzékel, az a hullám akkor indult el a gépről, amikor a pilóta a megfigyelőt (illetve a megfigyelő a gépet) a haladási irányhoz képest 60° -os szögben látta.

Mi történne akkor, ha a pilóta ettől a pillanattól kezdve már nem az eddigi egyenes pályán vezetné a repülőgépet, hanem fokozatosan süllyedő pályára állítaná úgy, hogy továbbra is 60° -ban lássa a megfigyelőt? A sebesség nagyságát nem változtatná, csak az irányát, néhány másodpercen keresztül. Bizony az történne, hogy a gép mozgásához rendelhető Mach-kúp továbbra is mindig átmenne azon a ponton, ahol a megfigyelő áll, s így ezen néhány másodperc alatt kiadott hang egyszerre érné el a megfigyelőt. Ez lenne ott az igazi hangrobbanás!

Azt a spirális síkgörbét, amelyhez található olyan pont a síkban, hogy a görbe bármely pontját az adott ponttal összekötő egyenes mindig ugyanakkora szöget zár be a pontbeli érintővel, *logaritmikus spirálnak* nevezzük.

Nézzük meg ezt a különleges hangrobbanást egy konkrét példán! Repüljön a gép kezdetben $H = 2000$ m magasan. Itt a hőmérséklet 0°C körüli, legyen a hangsebesség $c = 330 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, a gép sebessége pedig $v = 660 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. A számítás egyszerűsítése érdekében tételezzük fel, hogy a hangsebesség állandó, függetlenül a repülési magasságtól.

Kezdetben a gép távolsága a megfigyelőtől:

$$r_0 = \frac{H}{\sin 60^\circ} = \frac{H}{\cos 30^\circ} = \frac{2H}{\sqrt{3}} = 2309 \text{ m.}$$

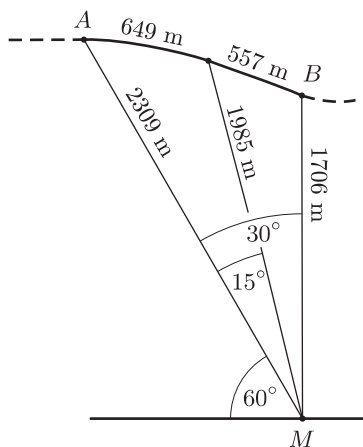
Ezután a gép egy logaritmikus spirálisra tér rá. Ennek polárkoordinátás egyenletét és az ívhossz (s) kiszámítási képletét levezetés nélkül közöljük:

$$\ln \frac{r_0}{r} = \frac{\varphi}{\sqrt{3}}, \quad s = \frac{v}{c}(r_0 - r) = 2(r_0 - r).$$

E képletek segítségével határozhatjuk meg a pálya azon ívét, amelyet addig fut be a repülőgép, amíg mondjuk a megfigyelési pont fölé kerül. (Akinek kedve és felkészültsége is van hozzá, megkísérelheti a képletek levezetését.)

Az *1. ábráról* leolvasható néhány adat, amelyeket a fenti képletek felhasználásával kaptunk. Ellenőrizhető, hogy a mintegy 7 másodpercig tartó AB út során kibocsátott összes hang egyszerre érkezik meg az M pontban álló megfigyelőhöz. A B pontban már a repülőgép 30° -os szögben süllyed, hamarosan le kell térjen erről a pályáról. Az M pontbeli hangrobbanás így is iszonyú lehet!

Érdekességként megemlítjük, hogy állítólag a sólyom is hasonló görbén repül, miközben mindig ugyanakkora szögben nézi leendő zsákmányát a földön. A természetben még számos példát találunk logaritmikus spirálisra, a napraforgó tányérjában a magok elhelyezkedésétől kezdve a csillagászati spirálgalaxisok karjainak alakjáig.



1. ábra

Függőleges síkú, egyenletes süllyedésű, lassuló repülés. Az úrsikló leszállása

A hangrobbanásokról sokszor olvashatjuk, hogy mire az ember meghallja, az azt keltő repülőgép már messze jár, rég elhaladt felettünk. Dehát akkor hogy lehet, hogy a leszálló úrsikló által keltett hangrobbanást sokkal hamarabb lehetett hallani az űrrepülőtéren, mint ahogy az úrsikló megérkezett oda?

Megvizsgáljuk az úrsikló leszállását egy olyan egyszerűsített modellben, ahol az úrsikló sebessége időben egyenletesen csökken, miközben süllyedésének sebessége állandó marad. Ez ugyan nem teljesül végig, hiszen a puha leszálláshoz az kell, hogy a süllyedés sebessége zérushoz közelítsen, de most nem is akarjuk vizsgálni a leszállás végső folyamatát, csak ameddig az úrsikló lelassul a hang sebességére. Becslésre a modellünk még jó lehet.

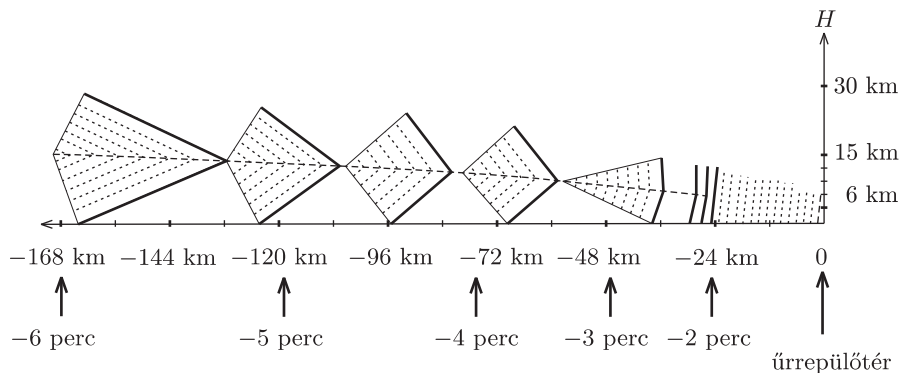
Az internetről levehető információk szerint az úrsikló sebessége 60-70 km-es magasságban még 6 km/s, és 15-20 perc van hátra a leszállásig. 15 km magasan még körülbelül háromszoros hangsebességgel halad, függőleges süllyedése 50 m/s (lásd pl. <http://urvilag.hu/article.php?id=163>). Innen kezdve kb. 5-6 perc alatt ér az űrrepülőtérré úgy, hogy az utolsó 2 percet már a hangsebességnél kisebb sebességgel teszi meg. A hangsebességet a 15 km körüli magasságban vehetjük 300 m/s-nak, most és a továbbiakban állandónak tekintjük. 900 m/s-ról kell tehát lecsökkennie a sebességnek 300 m/s-ra 3-4 perc alatt. Ehhez az átlagos lassulás

$$\frac{600 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{240 \text{ s}} \leq a \leq \frac{600 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{180 \text{ s}},$$

amely még nem jelent nagy terhelést az űrhajósok számára.

Az úrsikló tehát legfeljebb 6 km magasan van, amikor sebessége a hangsebesség alá csökken.

Egészen idáig az űrhajó keltette hangrobbanást egy olyan, csaknem sík hullámfront váltotta ki a földön, amely ott a tereptárgyakon szerteszét szóródott. Ahogy az úrsikló csökkenő sebessége közeledik a hangsebességhez, a Mach-kúp nyílásszöge egyre nagyobb lesz, ezért a hullámfront terjedési iránya egyre laposabb szögben éri a talajt (2. ábra). Amikor az úrsikló sebessége eléri a hangsebességhez, a Mach-kúp egy síkká nyílik szét, s ez a hullámfront majdnem párhuzamosan halad a talajjal. A front felső fele elkerüli a tereptárgyakat és szóródás nélkül halad előre. Világos, hogy sokkal előbb ér az űrrepülőtérré, mint a lassuló úrsikló.



2. ábra. A leszálló úrsikló keltette lökeshullámok ábrázolása a földetérés előtti -6 perctől -2 percig, miközben az úrsikló sebessége a hangsebesség háromszorosáról a hangsebességre csökken. Az űrrepülőtértől mért távolság 168 km-ről 24 km-re, az úrsikló repülési magassága 15 km-ről 6 km-re változik

Ha az űrsikló – mint ismert – 100 m/s sebességgel ér földet, akkor átlagosan 200 m/s sebességgel 2 perc alatt 24 km-t tesz meg. Ezt a távolságot a hang legfeljebb 80 másodperc alatt teszi meg, vagyis a hangrobbanás legalább 40 másodperccel megelőzi az űrsikló érkezését.

Radnai Gyula