

A KÁRMÁN-FÉLE ÖRVÉNYSOR

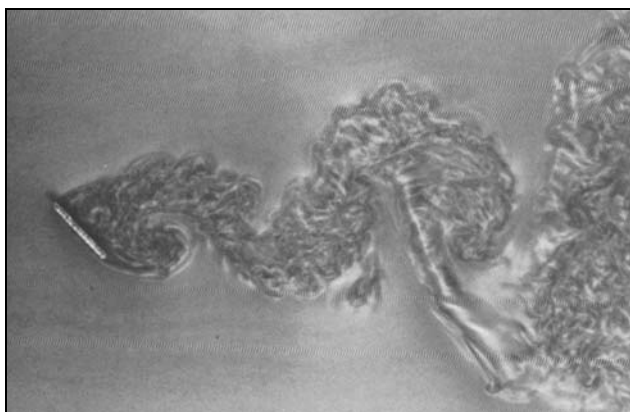
Lajos Tamás

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszék

Az áramlási jelenség

Az áramló közegekben megfigyelhető egyik legérdekesebb jelenséget, az áramlásra merőlegesen álló, átmérőjükhöz képest hosszú hengeres test mögött kialakuló, szabályosan elrendeződő örvényekből álló örvénysorokat Kármán Tódorról, a XX. század egyik legjelentősebb mérnök-tudósáról nevezték el, aki éppen száz évvel ezelőtt szerzett gépészmérnöki diplomát a Műegyetemen, és negyven éve lett ugyanennek az intézménynek a díszdoktora. Ez a tanulmány bemutatja a Kármán-féle örvénysorok keletkezését, jellemzőit és egy adott műszaki probléma elemzésén keresztül gyakorlati jelentőségüket.

Az áramlásban elhelyezett testek mögött bizonyos feltételek fennállása esetén egy érdekes áramkép alakul ki. Az 1.a. ábrán egy, az áramlás irányára merőlegesen elnyúló sík lemez látható, amelynek homlokfelületére ferdén áramlik a víz. Az áramlást szemléltetve a lemez mögött érdekes, kígyózó áramképet figyelhetünk meg. Az 1.b. ábrán hasonló áramképet látunk egy zátonyra futott tartályhajóból kiömlő olajról készített légifelvételen. Gyakran figyelnek meg örvénysorokat szatellit felvételeken is: a 2. ábrán a Grönland közelében lévő Jan Mayen sziget 2200 m magas kialudt vulkánja mögött a felhők egy örvénysort tesznek láthatóvá. Az ilyen örvénysorok több száz kilométerre is elnyúlhatnak, élettartamuk meghaladhatja az egy napot. Az örvénysorok létének akusztikai bizonyítékát is gyakran tapasztalhatjuk: erősebb szélben meghatározott frekvenciájú hangot bocsátanak ki, füttyülnek a fémhuzalok (pl. telefondrótok).



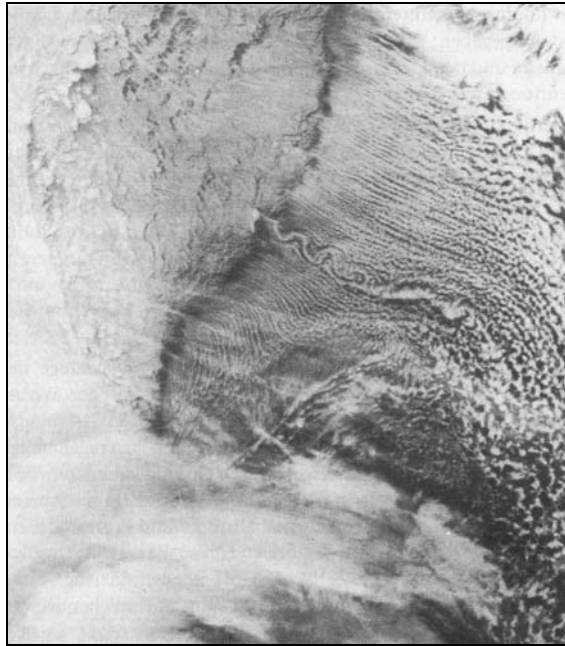
a.



b.

1. ábra

Áramkép egy sík lemez (a.) és egy zátonyra futott hajó mögött (b.)



2. ábra

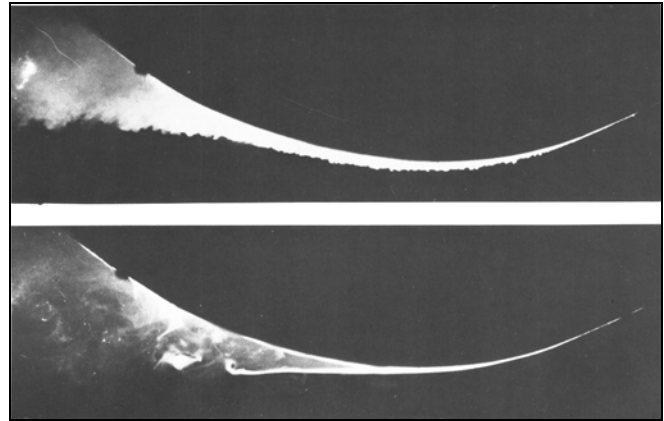
Örvénysor Jan Mayen sziget mögött

Az örvények kialakulása

Hogyan jön létre ez az érdekes áramkép? A jelenség megértéséhez először az áramlásba helyezett szilárd testek felülete közelében kialakuló határréteg leválását kell szemügyre vennünk. Közvetlenül a szilárd test felülete mellett az áramló közeg sebessége megegyezik a test sebességével, azaz álló test felülete mellett áll a közeg. Határrétegnek az áramlási tér fal melletti azon vékony rétegét nevezzük, amelyben a sebesség a fal melletti zérus értékről a faltól távolabb érvényes értékre nő. Ha a határrétegen kívüli áramlás lassul, mint pl. egy áramlásra merőlegesen elhelyezett körhenger hátsó részén, a nyomás áramlás irányában a jól ismert Bernoulli egyenlet értelmében növekszik. Az áramlás irányában növekvő nyomás következtében a határrétegben áramló közeg, amelynek kisebb a sebessége, és amelyet a fal is fékez, rohamosabban lassulhat, megállhat, és a nyomáskülönbség hatására visszaáramlás jöhet létre. Ilyenkor a határrétegben áramló közegrészek eltávolodnak a szilárd test felületétől, és bekerülnek az áramtér belsejébe. Ezt a jelenséget nevezzük határréteg leválásnak, amelyre példákat láthatunk a 3. ábrán. A 3.a. ábrán a láthatóvá tett határréteg a növekedő nyomás hatására az áramlás irányában (jobbra) rohamosan vastagszik, majd a benne áramló közeg elhagyja a szilárd test felületét és az áramlási tér belsejébe áramlik. A leválás helye mögött a nyomásnövekedés következtében a közeg a fal mellett ellenkező irányban (vissza)áramlik. A 3.b. ábrán egy áramlásba helyezett szilárd test felületén kialakuló lamináris (felül) és turbulens (alul) határréteg leválása figyelhető meg. Amíg a lamináris határréteg nyomásnövekedés esetén rögtön leválik, a turbulens határréteg a turbulens impulzuscsere következtében áramlás irányában sokkal tovább követi a szilárd falat.



a.

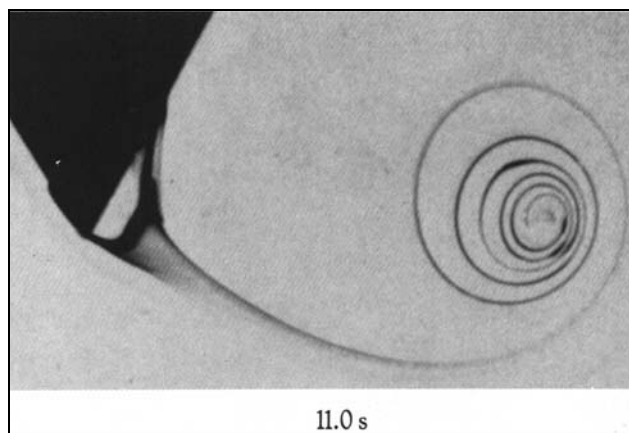


b.

3. ábra

Határréteg leválás

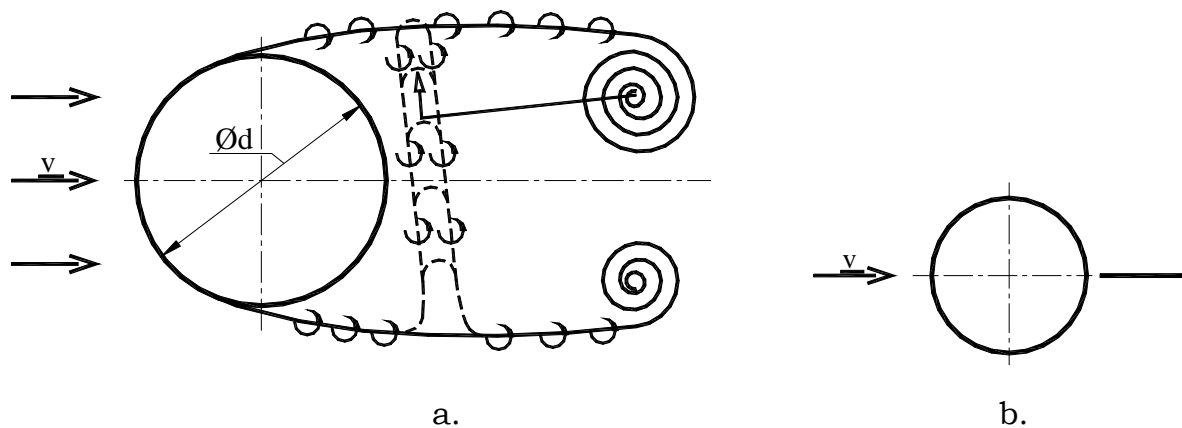
A határréteg leválás vonalához egy, a határrétegben áramló közegrészekből álló, viszonylag vékony felület csatlakozik, amelynek két oldalán a sebesség jelentősen különbözik, és amelyet nyírórétegnek nevezünk. A nyírórétegre merőleges gyors sebességváltozás miatt a nyíróréteget alkotó folyadékrészek forognak, ezért ezt a felületet folyékony örvényfelületnek nevezzük. Az örvényfelület jellemzője, hogy hajlamos felgöngyölni, ami a 4. ábrán látható.



4. ábra

Örvényfelület felgöngyölnése

Ha egy, az átmérőjéhez képest hosszú körhengert áramlásba helyezünk úgy, hogy tengelye merőleges a sebességre, a henger két oldalán határréteg leválást tapasztalunk, amelynek vonalához két, egymással ellentétes irányban forgó folyadékrészeket tartalmazó örvényfelület (nyíróréteg) csatlakozik és úszik le folyamatosan. Mindkét örvényfelület egy - egy időben növekvő méretű örvényben göngyölni kezd fel a henger mögött (5.a. ábra).



5. ábra

Az örvénysor keletkezésének modellje (a.), a periodikus örvényleválást megszüntető lemez a henger mögött (b.)

Ha a henger átmérőjével (d [m]) és a zavartalan áramlási sebességgel (v [m/s]) számolt Reynolds-számra fennáll $Re = v \cdot d / \nu > 40$ (ahol ν [m²/s] az áramló közeg kinematikai viszkozitása), az egyik örvény dominánssá válik. A domináns örvény által indukált sebesség a másik örvényfelületet a henger mögött keresztben elmozdítja (az 5.a. ábrán szaggatott vonallal jelöltük a másik örvényfelület egymás utáni helyzetét). Amikor ez utóbbi eléri a domináns örvényt tápláló, és ellenkező irányban forgó folyadékreszket tartalmazó örvényfelületet, azt mintegy elvágja. Az "örvény utánpótlástól" megfosztott domináns örvény elúszik, a helyén egy másik örvény kezd el felgöngyölni, miközben a másik örvény válik dominánssá. A folyamat, a határréteg leválás helyéhez csatlakozó örvényfelületek (nyírórétegek) kölcsönhatása folytatódik, így felváltva válnak le örvények a henger egyik és másik oldaláról. A fenti modell helyességét alátámasztja az a tapasztalat, hogy a henger mögött az áramlással párhuzamos szimmetriasíkban elhelyezett lemezcsik (5.b. ábra), amely gátolja a nyírórétegek kölcsönhatását megszünteti az örvények keletkezését.

Az örvények keletkezésének frekvenciája

Az 5.a. ábrán látható modellel megbecsülhetjük, hogy milyen tényezőktől függ az örvények keletkezésének frekvenciája. Legyen két örvény leűszása között eltelt t_1 [s] idő arányos azzal az idővel, amely alatt a domináns örvény "áthúzza" a másik örvényt tápláló örvényfelületet az örvényfelületeket elválasztó, a henger átmérőjével arányosnak vett szakaszon. Az örvényfelület "áthúzásának" sebessége nyilvánvalóan arányos az áramló közeg zavartalan sebességével. Ebből adódik: $t_1 \sim d/v$. Az örvényleválás periódusideje $t = 2 \cdot t_1$ az az időtartam, amely alatt a henger mindkét oldaláról egy-egy örvény leűszik. Bevezetve az örvényleválás frekvenciáját írható: $f = 1/t \sim v/d$. Az egyszerű modellből átrendezés után az adódik, hogy $f \cdot d/v = Str = \text{állandó}$. (Az $f \cdot d/v$ dimenziótlan mennyiséget Strouhal-számnak nevezzük.) Kísérleti tapasztalatok azt mutatják, hogy széles Reynolds-szám tartományban ($400 \leq Re \leq 3 \cdot 10^5$) a Strouhal szám a modellünknek megfelelően állandó: $Str = 0.21$. Ebben a Reynolds-szám tartományban tehát a frekvenciára

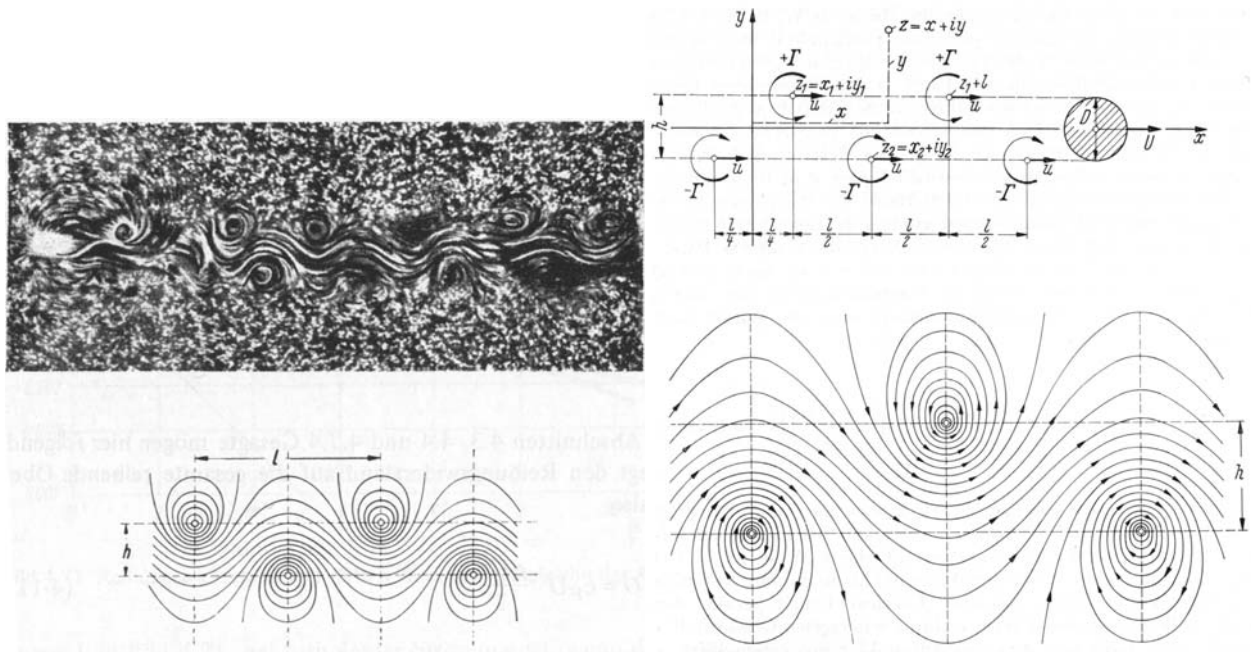
írható: $f=0.21 \cdot v/d$, azaz az örvényleválás frekvenciája a sebességgel egyenesen, az átmérővel fordítottan arányos.

Ez az örvényleválás nemcsak körhenger alakú testeknél, hanem más keresztmetszet alakú testeknél, áramlásra merőlegesen elhelyezett, szélességéhez képest hosszú tompa testeknél (pl. áramlással szembefordított lemezcsík, háromszög keresztmetszetű rúd) is bekövetkezik. (Tompá testeknél – szemben az áramvonalas testekkel – a határreteg leválás jelentősen befolyásolja az áramképet.)

A periodikus örvényleválás szabályosságát és a Strouhal-szám állandóságát használják ki azok a mérőműszerek, amelyeknél egy cső átmérője mentén elhelyezett hengerről leváló örvények frekvenciájának mérésével határozzuk meg a csövön átáramló közeg térfogatáramát.

Az örvénysor stabilitása

A periodikus örvényleválás eredményeként egy örvénysor keletkezik. A 6.a. ábrán nyugvó vízben v sebességgel mozgatott henger mögött kialakuló áramképet mutatja a víz felszínére szórt szemcsékről készített időfelvétel. Jól láthatók a két sorban, egymástól fél örvény távolságyira eltolva elhelyezkedő örvényekből álló örvénysor. Miközben új örvények válnak le a hengerről, az egész örvénysor bal felé elmozdul.



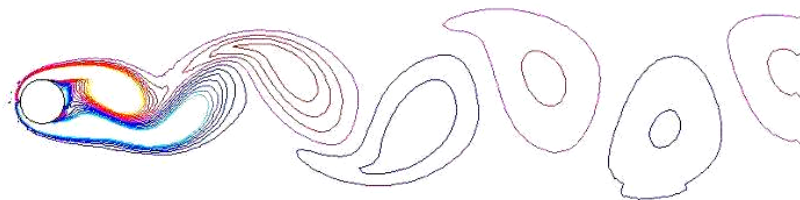
6. ábra

Álló folyadékban mozgatott henger mögött kialakuló örvénysor az áramképének szemléltetése (a.), az áramkép számítási modell (b.), a számolt áramkép áramvonalai (c.)

Ennek az örvénysornak a stabilitását vizsgálta Kármán Tódor, akinek igen tanulságos és követendő mondása volt "Nincs praktikusabb egy jó elméletnél". Eredményeit 1912-ben publikálta. Sűrűlódásmentes közeget és síkáramlást (azaz végtelen hosszú hengert) és mindkét irányban végtelen hosszú örvénysort tételzett fel. Az örvénysort a 6.b. ábrán látható módon két, egymástól h [m] távolságban lévő sorban egymástól l [m] távolságban elhelyezett, egyenlő erősségű, de soronként ellenkező forgásirányú potenciális örvényekkel modellezte. Az örvények által létrehozott sebességtér áramvonalait a 7.c. ábra szemlélteti. Kármán Tódor kimutatta, hogy egy ilyen örvénysor az örvények kezdeti helyzetének kis zavarásaival szemben csak abban az esetben stabil, ha az ellentétes forgásirányú örvények áramlás irányú távolsága $l/2$, és áramlásra merőleges távolsága az örvényeket keltő test keresztmetszetének alakjától függetlenül $h=1/\pi$, azaz $h/l = 0.286$. Kármán Tódor az általa javasolt modell felhasználásával egy összefüggést határozott meg az álló közegben mozgó henger mögött keletkező örvénysor mozgási sebességére is, amely kis Reynolds-számoknál jó egyezést mutat a kísérletekkel. A modell lehetőséget adott a hengerre ható áramlási eredetű ellenállás erőre vonatkozó összefüggés levezetésére is.

Az örvénysor alakja jelentős mértékben függ a Reynolds-szám értékétől. Kármán elméletének megfelelő örvénysort $40 \leq Re \leq 150$ Reynolds-szám tartományban figyelhetünk meg. Tovább növelve a Reynolds-számot $150 \leq Re \leq 300$ tartományban lamináris-turbulens átalakulás játszódik le az örvénysor esetenkénti megzavarásával. Efölött a turbulencia miatt a leúszó örvények szabályossága megszűnik, az örvények intenzitása időben gyorsan csökken, miközben folyamatosan szélesedik az örvénysor (ld. 1. ábra). Amikor a henger homlokfalán a határréteg turbulenssé válik ($Re \approx 3 \cdot 10^5$) az intenzív és periodikus örvényleválás megszűnik. Nagyobb Reynolds-szám tartományban $Re > 3 \cdot 10^6$ ismét kimutatható örvények keletkezése, a Strouhal-szám értéke a különböző közlemények szerint $Str = 0.2$ és 0.26 között változik (ld. 1. és 2. ábra).

A 7. ábrán a henger körüli áramlás FLUENT szoftverrel történő numerikus szimulációjának eredménye látható $Re=190$ Reynolds szám esetén. Az ábrán síkáramlás feltételezésével elvégzett számítások eredményeként kapott állandó örvényességgel (folyadék rész forgási szögsebességgel) jellemezhető pontokat összekötő vonalakat vittük föl. Látható, hogy az örvénysor áramlás irányában tágul, és az örvények intenzitása keresztmetszetük növekedése és a disszipáció következtében csökken.



7. ábra

A henger körüli áramlás numerikus szimulációja: állandó örvényességű vonalak

Az örvénysor hatása áramlásba helyezett testekre

Az áramlásra merőlegesen elhelyezkedő hengerről periodikusan leváló örvények következtében az áramlás síkjára merőleges, periodikusan változó erő hat a hengerre. Ha az oldalirányú erő frekvenciája a szerkezet sajátfrekvenciájával egyezik meg, vagy annak közelében van, akkor a szerkezet periodikus mozgásával, rezgésével kell számolni, amelynek amplitúdója a gerjesztő áramlási eredetű erő nagyságától és a szerkezet belső csillapításától függ.

Ahogy korábban láttuk, az f örvényfrekvencia arányos az áramlási sebességgel. Ez a lineáris összefüggés a henger sajátfrekvenciája környezetében nem áll fenn, itt az örvényfrekvencia szinkronizációja figyelhető meg. Ez a jelenség az alábbi módon következik be. A sebességet növelve nő az örvényleválás frekvenciája. Még mielőtt elérnénk a henger sajátfrekvenciájának (a rezonanciafrekvenciájának) megfelelő áramlási sebességet, a henger már rezegni kezd, és az örvényleválás frekvenciája "felugrik" a rezonancia frekvenciára, majd viszonylag széles sebességtartományban állandó marad. Tovább növelve a sebességet, egy adott sebességnél az örvényleválás frekvenciája "fölugrik" a sebességnek megfelelő frekvenciára, majd növekvő sebesség esetén ismét lineárisan nő azzal. A szinkronizáció jelensége tehát a rezonanciát okozó megfúvási sebesség tartományt jelentősen kiszélesíti.

Az oldalirányú, a rezgést gerjesztő erő nagysága az $F_0 = \frac{\rho}{2} v^2 L d c_0$ összefüggésből számolható, ahol ρ [kg/m³] az áramló közeg sűrűsége, v [m/s] a megfúvási sebesség, d [m] a henger átmérője, L [m] a henger hossza, c_0 [-] az oldalerő tényező. Ennek nagysága az esetünket jellemző Reynolds-szám tartományban $c_0 = 0.4-0.6$ körüli érték. Látható, hogy az áramlási sebesség négyzetével változik a gerjesztő erő, azaz csökkenő szélesebességeknél rohamosan csökken.

Az örvényleválásból származó periodikus gerjesztés szerkezetek, építmények kémények tönkremenetelét okozhatják. A következő fejezet a periodikus örvényleválás folytán fellépő műszaki problémát és annak megoldását ismerteti.

Térvilágítási fényvető oszlopok lengése

Az egyik közúti határátkelőhelyünkön felállított hat, 30 m magas fényvető oszlop közül a közeli folyó gátjához legközelebb eső háromnál az oszlopok nagymértékű rezgését tapasztalták. Erre heti gyakorisággal, de csak kis szélesebességek esetén került sor, amikor a talajszinten alig volt érzékelhető az áramlás. A rezgést jól jelezte (és a közelben tartozók számára különösen félelmesé tette) az a csattogó hang, amely az oszlopban lévő drótkötél és az oszlop belső fala közötti periodikus érintkezéskor keletkezett. Az oszlop rezgés frekvenciáját $f = 2/s$ -ra becsülték. A rezgő oszlop tengelye kb. 1/2 hullámot ír le, legnagyobb kitérése kb. 2/3 magasságban van. A kitérés amplitúdója tekintetében megoszlának a vélemények: 20-40 cm közötti értékeket adtak meg mindkét irányban. Az oszlop mozgása időben egyre hevesebb: az amplitúdó időben növekszik.

A 30 m magas oszlop átmérője $d = 618$ mm-ről folyamatosan csökken $d = 160$ mm-re. A megfigyelt legnagyobb amplitúdó helyén, 20 m magasságban az oszlop átmérője $d = 0.3$ m. Ha elfogadjuk a megfigyelt $f = 2/s$ sajátfrekvenciát, és közelítően $Str = 0.2$ értéket veszünk fel, akkor a sajátfrekvenciával megegyező

örvény leválási frekvencia $v = f \cdot d / \text{Str} = 2 \cdot 0.3 / 0.2 = 3 \text{ m/s}$ szélesebbégnél adódik. (A sajátfrekvenciájára számítással közelítőleg 2.7/s értéket kaptunk.) 20 m magasban uralkodó 3 m/s sebességű szélhez a talajhoz közel, 2 m magasságban kb. 1.5 - 2 m/s sebesség tartozik. Ez a 12 fokozatú Beaufort skálán 1 - 2 erősségű szélnek felel meg, amelynél az arcon éppen lehet érezni a levegő mozgását. Ez az érték jól megfelel a megfigyeléseknek: az oszlopok rezgését csak alig érzékelhetően kis szélesebbégek esetén tapasztalták.

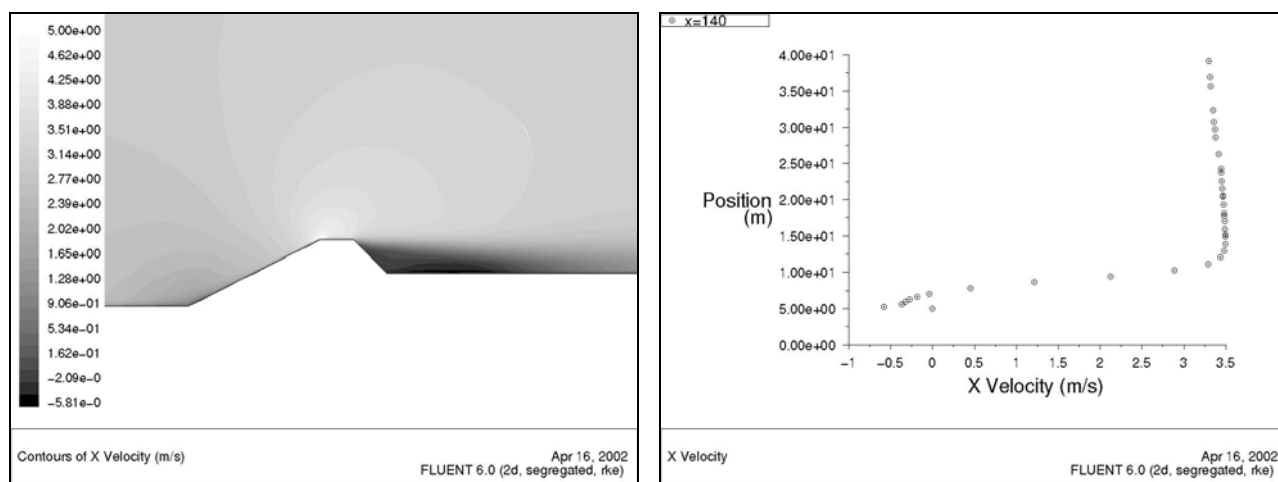
A fenti sebességgel és átmérővel kiszámítva a Reynolds-szám értékét, $v = 15 \cdot 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ kinematikai viszkozitással $\text{Re} = 3 \cdot 0.3 / 15 \cdot 10^6 = 60.000$ adódik, tehát abban a tartományban vagyunk, ahol intenzív örvényleválás és 0.2 értékű Strouhal-szám várható. Az oldalirányú gerjesztő erő a kis szélesebbégek következtében kicsiny: az oszlop $L = 1 \text{ m}$ hosszúságú szakaszára a fenti összefüggés alapján $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ levegő sűrűséggel $F_0 = 1.2 / 2 \cdot 3^2 \cdot 0.3 \cdot 0.5 = 0.8 \text{ N/m}$ adódik. Az erő kis értékéből következik az a megfigyelések során tapasztalt jelenség, hogy a rezgés amplitúdója hosszabb időn át fokozatosan növekszik. Az oszlopnak több rezonancia frekvenciája van attól függően, hogy milyen modulusban rezeg. Ennek megfelelően több szélesebbégnél is kialakulhat más-más frekvenciájú rezgés. Ezt azonban nem figyelték meg.

Az oszlop kúpossága az adott kúpszög esetén a szakirodalom szerint kb. felére csökkenti a gerjesztő erőt, a szél turbulenciája hasonló hatást gyakorol. Felmerül a kérdés, hogy a hat oszlop közül miért csak a három, gáthoz közel lévő rezeg. (További mintegy 100 oszlop van az országban, de ilyen jelenséget egyiknél sem tapasztaltak.)

Felfelé csökkenő átmérőjű oszlop esetén az $f = \text{Str} \cdot v / d$ összefüggés értelmében akkor lenne azonos az oszlop minden pontján az örvényleválás frekvenciája, ha a magasság függvényében az átmérő csökkenésének megfelelő arányban csökkenne a szélesebbégek. Az atmoszférikus határretegben a szél sebessége ezzel ellentétesen változik, felfelé haladva növekszik, azaz az oszlop magassága mentén mind a szélesebbégek növekedése, mind pedig az átmérő csökkenése miatt nő az örvényleválás frekvenciája. Ha az oszlop magassága mentén a frekvencia változása jelentős, az örvényfrekvencia szinkronizáció nem tud kialakulni, így nem jön létre intenzív rezgés. Esetünkben 10 és 30 m magasság között az átmérő csaknem harmadára csökken, szokásos sebességprofil feltételezve 10 és 30 m magasság között a szélesebbégek pedig mintegy 30%-kal nő. Így az örvényleválás frekvenciája: $f = v \cdot \text{Str} / d$ közel 1:3.8 arányban változik az oszlop felső 2/3-án. Ezt az eltérést az örvényleválás szinkronizációja nem képes áthidalni, ezért nem tapasztalják ezeknek az oszlopoknak a rezgését.

Ha azonban a gát gyorsító hatása következtében a gát koronája közelében helyileg felgyorsul a levegő, és egy adott oszlop szakaszon felfelé csökkenő sebesség alakul ki, az oszlop magassága mentén kisebb mértékben változik az örvényleválás frekvenciája, tehát megteremtődik a szinkronizáció létrejöttének feltételei. A 8.a. ábrán a gát körüli áramlás numerikus szimulációjának eredménye, a 8.b. ábrán a szélesebbégek függőleges menti megoszlása látható az egyik rezgő oszlop helyén. Megfigyelhető, hogy a várakozásnak megfelelően a gát a korona magasságában és afölött felgyorsítja az áramlást, így az áramlási sebesség kis mértékben csökken felfelé, ami miatt az oszlop felső kétharmadán 1:3.8 helyett csak 1:2.8 arányban (1.5/s és 4.2/s között) változik az örvényleválás frekvenciája. Ennél a kisebb frekvencia aránynál a 2/s oszlop sajátfrekvencia körül létrejött a szinkronizáció.

A periodikus örvényleválás intenzitását megnövelte a gát következtében gyorsuló áramlásban csökkenő turbulencia hatása is.



a.

b.

8.ábra

A gát körüli áramlás numerikus szimulációja: a szélesség térbeli megoszlása (a.), a sebességmegoszlás a rezgő oszlopoknál (b.)

Az oszlopok lengésének megszüntetése

Az oszlopok rezgését három módszerrel lehet megszüntetni:

- a rezonanciafrekvencia elhangolásával,
- a belső csillapítás növelésével,
- a periodikus gerjesztő erő megszüntetésével.

Az a) módszer alkalmazása esetén az oszlop tömegének, tömegelosztásának és rugalmassági sajátosságainak változtatásával úgy kell csökkenteni a rezonancia frekvenciát, hogy csak olyan kis szélességnél essen egybe az örvények keletkezésének frekvenciájával, amelyeknél a belső csillapítás már meghaladja a gerjesztő erő munkáját. E módszer alkalmazása nem vezetett eredményre. A kis szélességeknél is bekövetkező intenzív rezgés azt mutatja, hogy az oszlop belső csillapítása viszonylag kicsi.

A b) módszer ugyancsak nehezen alkalmazható ebben az esetben, mert az oszlop belsejében nincsen elég hely az oszlop mozgási energiáját elnyelő berendezések elhelyezésére, kívül pedig a lámpatestek leereszthetősége miatt nem helyezhetők el sodronyok, különféle berendezések.

A c) módszer alkalmazása látszott célszerűnek, amelynél az áramlási eredetű periodikus gerjesztő erőt csökkentjük, ill. szüntetjük meg. A leváló örvények befolyásolásának sokféle módszere van, ezek közül a legegyszerűbb és legjobban bevált módszert, a spirál alakú lemezcsíkok alkalmazása. Itt az oszlop felületére merőlegesen, spirál alakban felerősített lemezcsíkok akadályozzák meg a periodikus örvények kialakulását, ezáltal megszüntetik a gerjesztő erőt.



9. ábra

A periodikus gerjesztés megszüntetése spirál alakú csíkokkal

A szakirodalom alapján az optimális kivitel három $5 \cdot d$ menetemelkedésű spirál alakú csík, amelynek a szélessége az átmérő 10-12%-a. A csíkokat nem szükséges a teljes oszlop hosszon alkalmazni, elegendő az oszlop magasságának 40-90%-a között.

E megoldás hátránya, hogy megnöveli a széliránnyal párhuzamos áramlási eredetű ellenállás erőt, azaz az oszlop terhelését, amely az $F_e = \frac{\rho}{2} v^2 D L c_e$

összefüggéssel számolható. A képletben az ellenállástényező a teljes sebesség- (Reynolds-szám) tartományban $c_e = 1.4$, D pedig az oszlop átmérő és a lemez szélesség kétszeresének az összege. Ezért a spirál alakú lemezcsíkok alkalmazása esetén az oszlop szilárdsági szempontból ellenőrizendő.

Összefoglalás

A Kármán-féle örvénysor egyike az áramló közegekben megfigyelhető érdekes és komplex jelenségeknek. A periodikusan leváló örvények a mérés-technikai felhasználás mellett általában kedvezőtlenek: szerkezeteket, építményeket tehetnek tönkre, ha keletkezésük frekvenciája azok sajátfrekvenciájának közelében van. A kedvezőtlen hatások megelőzése, vagy elhárítása szép mérnöki feladat. Kármán Tódor kilencven évvel ezelőtt publikált cikkében egy igen eredeti megközelítéssel kapott eredményeit adta közre: modelljével meg lehet határozni az örvénysor stabilitásának geometriai feltételeit, az örvénysor mozgási sebességét és a hengerre ható ellenállás erőt. A modelljével végzett számítások eredményei meghatározott körülmények között jól egyeztek a mérésekkel. Kiváló eredményét az utókor méltón elismeri: nincsen olyan áramlástan könyv, amely a Kármán-féle örvénysort ne tárgyalná.