



H03

DINAMIKUS NYOMÁSMÉRÉS HENGERES TESTEK FELÜLETÉN

1. A mérés célja

- Mérés célja: ismerkedés a számítógépes adatgyűjtéssel, időben változó nyomásjelek rögzítése és kiértékelése.
- Átlagos nyomástényező eloszlás meghatározása kör- és négyzet alapú hengerek felületén, határréteg-leválás helyének meghatározása.
- Következtetés a fal közelében kialakult turbulenciaviszonyokra a nyomásértékekből számolt, időbeli ingadozást jellemző négyzetes középérték (RMS) alapján
- Nyomásjelek gyors Fourier-transzformációval (FFT) kapott frekvenciaspektrumának elemzése, örvényleválási frekvenciák detektálása, örvényleválás frekvenciájából számolt Str szám Re-szám függésének vizsgálata.

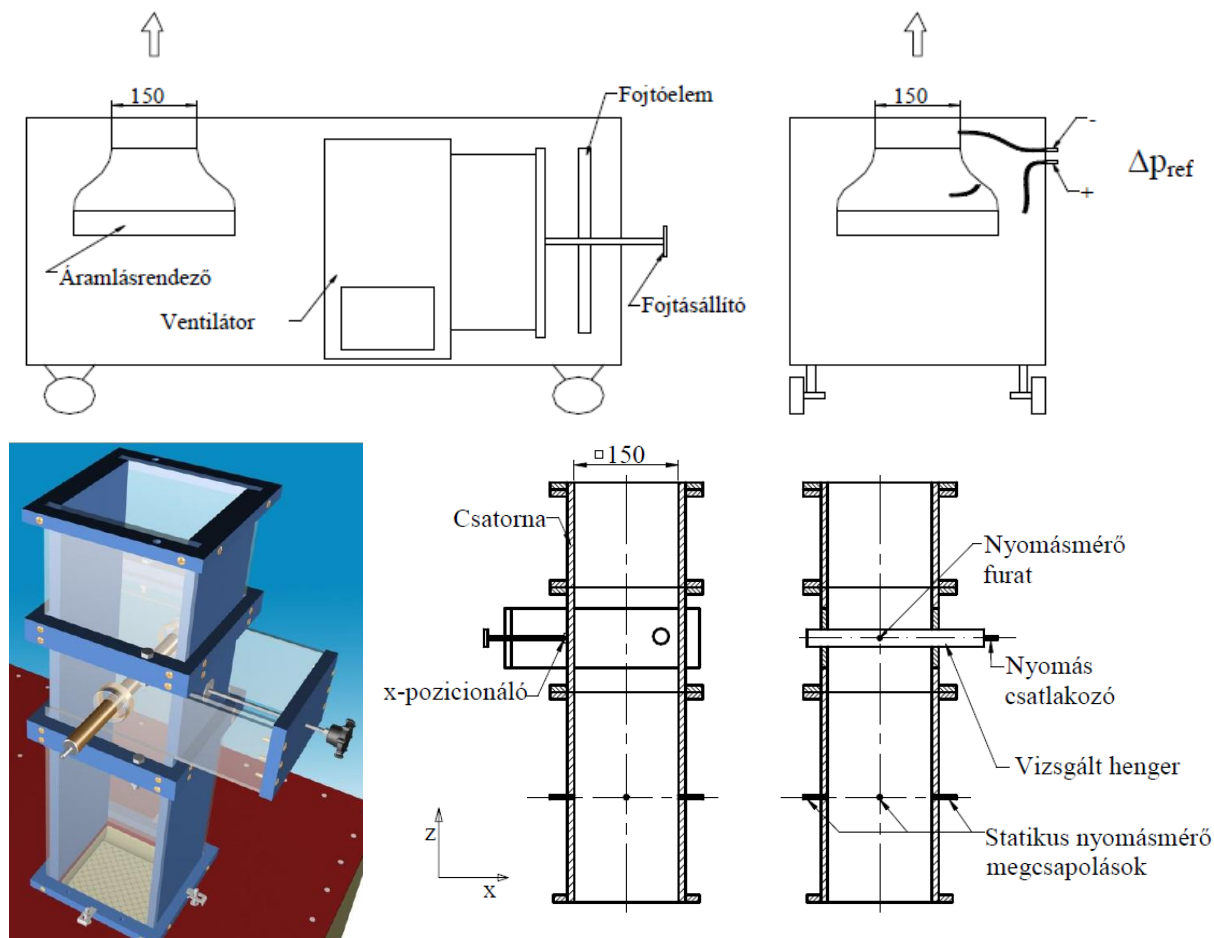
2. A mérési berendezés leírása

A mérőberendezés alapját a M03-as BSc Áramlástan M03-as tantárgy (BMEGEÁTAG11) M03-as mérőkocsija adja. Az asztal nagyságú berendezés vázlatát az **1. ábrán** láthatjuk. A kerekre szerelt szekrényben található radiális ventilátorral áramoltatjuk a levegőt. Az áramló levegő sebességének szabályozása szívóoldali fojtással történik. A maximálisan elérhető sebesség a 150x150 mm-es kifúvó keresztmetszetben kb. 32 m/s. A v kiáramlási sebesség és a szélcsatorna oldalán lévő kivezetésen mérhető referencia nyomáskülönbség (Δp_{ref}) között a mérőkocsi tetején található kalibrációs összefüggés teremt kapcsolatot.

A szélcsatorna kifúvó nyílására szereltünk egy függőleges, négyzet keresztmetszetű, zárt mérőcsatornát, amelybe a mérni kívánt hengert helyezük. A mérőcsatorna szerkezete a **1. ábrán** látható. A kalibrációs konstans értékét a mérés elvégzése után (lehetőség szerint) ellenőrizni kell Prandtl-csővel sebességméréssel. (pl. a mérőcsatorna kilépő keresztmetszetét 4 egyenlő részre osztva meghatározzuk az átlagsebességet).

A mérőcsatorna egyik elemének kialakítása olyan, hogy abba különböző átmérőjű mérőhengereket lehet illeszteni. Ez az elem egy menetes orsó segítségével lehetővé teszi a hengerek hossz tengelyükre merőleges elmozdítását, valamint a henger tengelyével párhuzamos mozgatása is megoldott. A mérőhengerek palástján lévő kis átmérőjű furat van, segítségével mérhetjük a lokális statikus nyomást. A csatorna falán a négy oldalfali statikus

nyomáskivezetést egy körvezeték köti össze, ezen mérhető a csatornában uralkodó helyi statikus nyomás. A fali nyomástényező későbbi meghatározásához a henger nyomáskivezetésén mérhető nyomás és a csatornában uralkodó (körvezetéken mérhető) helyi statikus nyomás különbségét kell mérnünk.

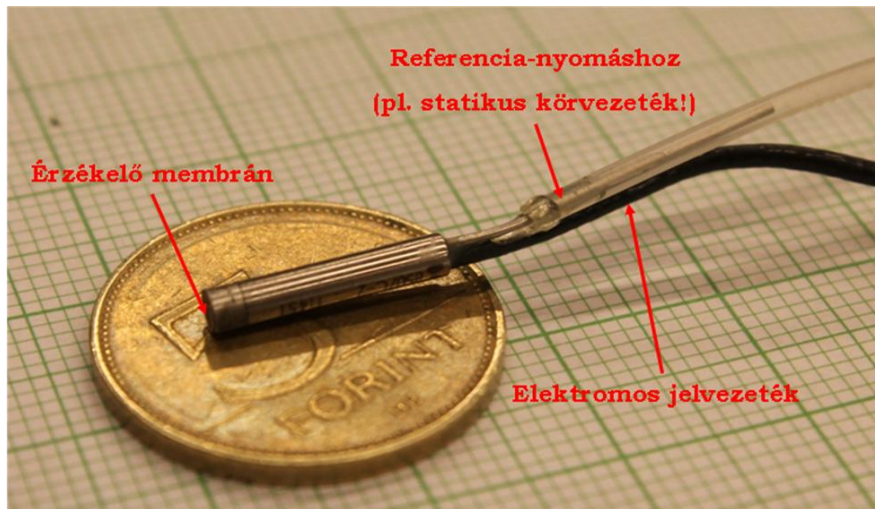


1.ábra Az M03 mérőkocsija és a függőleges mérőcsatorna

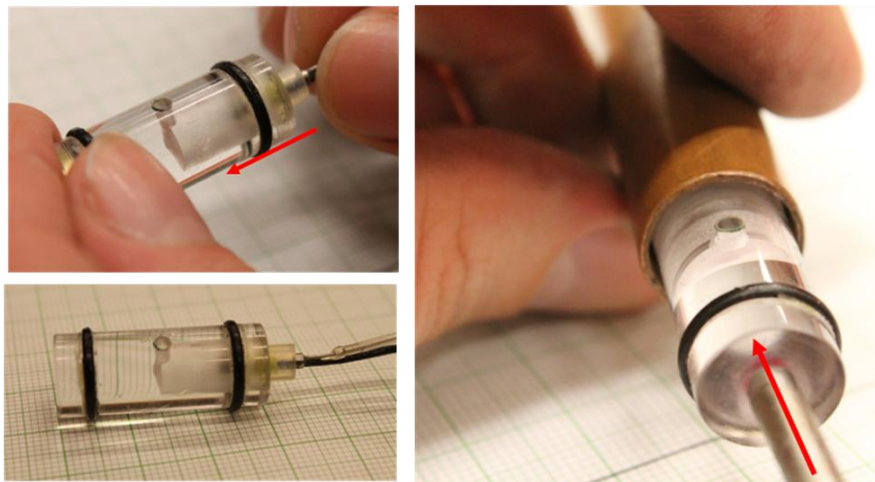
Hogy a henger palástján lévő mérési pontban a nyomás időbeli változását, dinamikus jellemzőit is jól tudjuk rögzíteni, szükséges, hogy kellően nagy időbeli felbontású nyomásmérő rendszert használjunk. Fontos az is, hogy a nyomásmérő műszerünket a lehető legközelebb helyezzük el a nyomásmérés helyéhez, mivel bármely nyomást továbbító mérővezeték rendelkezik egy frekvenciaátviteli karakterisztikával, amelynek megfelelően a rajta áthaladó nyomásjeleket torzítja. (a jelet alkotó harmonikus összetevők amplitúdóját és fázisát azok frekvenciája függvényében megváltoztatja).

Ezeket a szempontokat figyelembe véve a nyomásjelek rögzítéséhez egy kisméretű, széles torzításmentes frekvenciaátviteli tartománnyal rendelkező miniatűr piezorezisztív ENDEVCO gyártmányú nyomástávadót használunk (2. ábra), amelyet közvetlenül a vizsgált hengerbe építünk be. A szenzor elülső részén található a nyomásérzékelő membrán. A membrán mögötti üreget kis átmérőjű szilikon cső köti össze a referencia nyomásmérési hellyel (esetünkben a körvezetékkel). A szenzor egy hengeres plexi foglalat zsákfuratába illeszkedik, erre merőlegesen egy másik furat vezet ki a foglalat palástjára (3. ábra). A plexihenger mindkét végén légmentesen záró tömítőgyűrű van. A foglalat egy pálcával betolható a mért henger belsejébe, egészen a paláston kialakított mérőfuratig. A szenzor nyomásérzékeny membránja így csupán néhány mm-re kerül a mért henger palástfelületén lévő nyomásmérési ponttól, ezért közvetlenül fel tudja venni a kisméretű

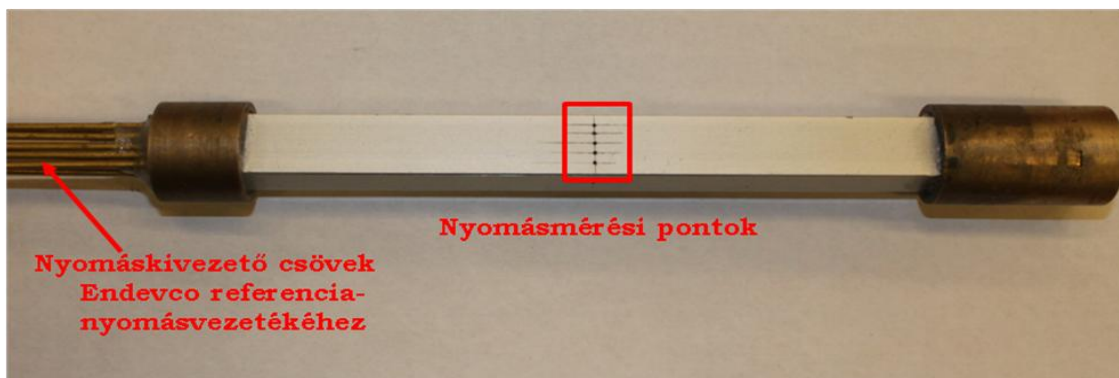
nyomásingadozásokat is. A mért nyomásjelet a szenzor elektromos feszültségjellé alakítja át, és elektromos jelvezetéken keresztül továbbítja a számítógépes adatgyűjtő rendszerhez.



2. ábra: A mérés során használt miniatűr ENDEVCO nyomástávadó



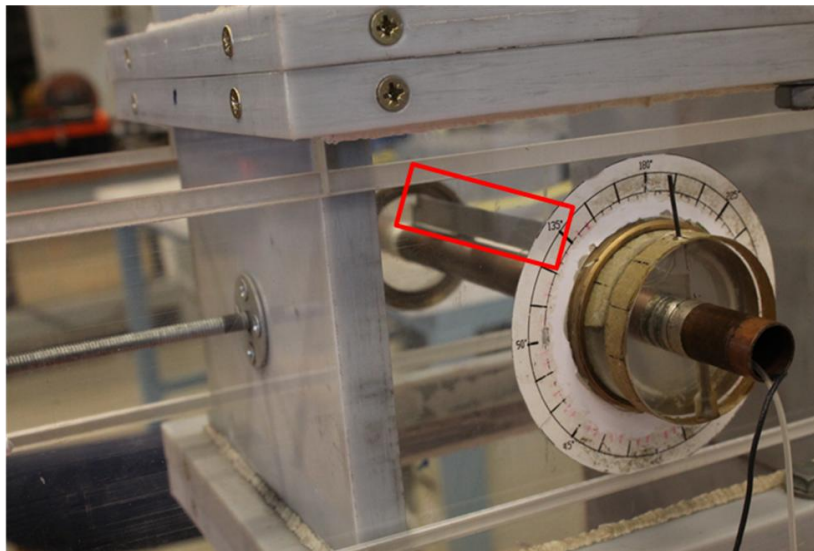
3. ábra A nyomástávadó behelyezése a hengeres foglalatba, beszerelés a mérőhenger belsejébe



4. ábra A négyzet alapú henger és a felületén kiképzett mérőfuratok

A hengeres mellett a mérőcsatornában vizsgálható egy négyzet alapú henger is (**4. ábra**), ennek a felületén több nyomásmérési hely van kialakítva. Ennél a testnél a nyomástávadónak közvetlenül a nyomásmérési hely közelébe helyezése egyelőre nem megoldott, a nyomások kivezetése rézcsöveken keresztül történik, ezeket aztán szilikon csővel kapcsolhatjuk össze az ENDEVCO nyomástávadó referncia-nyomásvezetékével. Így a négyzetes keresztmetszetű test mérése esetén a nyomástávadó maradhat a csatornából kiszerezelt hengeres test belsejében. Ebben az esetben persze az ENDEVCO nyomástávadó a légköri nyomáshoz képest méri a felületi pontok nyomását a négyzetes keresztmetszetű hengeren, és egy kézi nyomásmérővel mérnünk kell a mérőcsatorna-körvezetéken a helyi statikus nyomást a légkörihez képest is.

A mérőcsatornába a hengeres vizsgált test mögé az áramlás irányával párhuzamosan beszerelhető egy vékony alumínium lemez, az ún. „splitter plate” is (**5. ábra**).



5. ábra A mért henger mögé beépített „splitter plate”

A mérőberendezés része még az adatfeldolgozó rendszer. Ennek része egy analóg-digitális konverter, amely a nyomástávadó analóg feszültségjelét mintavételezi, digitálisan kvantálja és kódolja, valamint az előzetesen megadott kalibrációs összefüggés alapján nyomásjellé alakítja át. A digitális formában kódolt nyomásjel a mérőszámítógépen futó, tanszéki fejlesztésű adatgyűjtő és kiértékelő szoftver (*Pressure and Force*) segítségével tárolható és dolgozható fel. Az adatgyűjtő rendszer mintavételezési frekvenciája növelhető akár néhányszor 10 KHz-ig is, a gyakorlatban jelen méréshez elegendő 1-5 KHz-es mintavételezési frekvencia beállítása.

Hogy egy szöghelyzethez (felületi nyomásmérési helyhez) tartozó rögzített nyomásjel statisztikailag reprezentatív legyen és a lehető legtöbb információt nyerjük ki belőle, időben legalább kb. 10 s hosszú mérés nyomásjelének rögzítése javasolt. Egy mérés (single measurement) elvégzése során a mérőszoftver menti magát a mintavételezett nyomás-idősort (timeseries), de automatikusan kiszámolja a rögzített jel-értékekből (p_i) a nyomás –időátlagot (p_{MEAN}), valamint az időátlagtól számított átlagos négyzetes eltérést is (p_{RMS} ; RMS: Route Mean Square error)

$$p_{MEAN} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N p_i \quad p_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=0}^N (\bar{p} - p_i)^2}$$

3. A mérés elméleti háttere

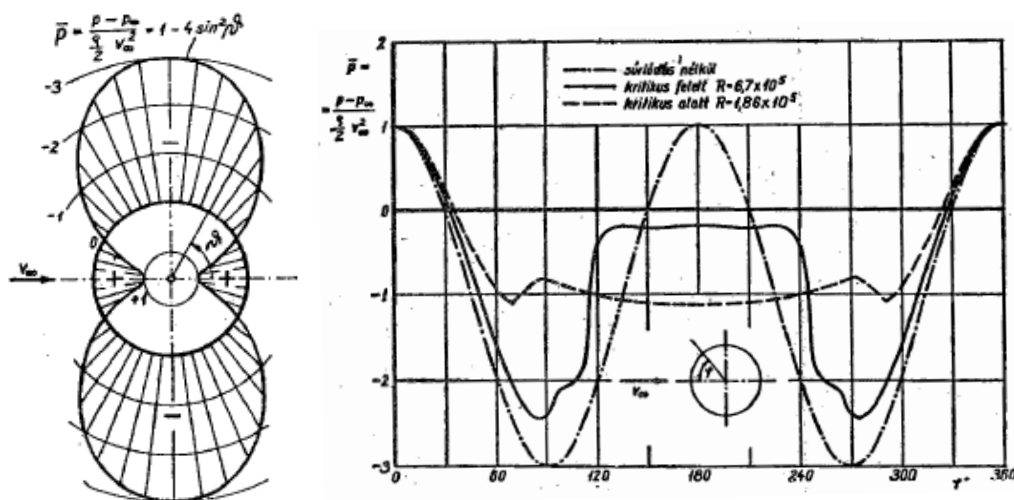
Egy áramlásba helyezett testre ható ellenállásereő a felületi nyomás- és nyírófeszültség-eloszlás integrálásával kaphatjuk meg. A nyírófeszültség-eloszlásból származó erő a nyomáseloszlásból származó erőnél nagyságrendekkel kisebb, közvetlenül az ellenállásereőre nincs hatása. Azonban a fal közelében jelen lévő sűrűdés határreteg-leválást idéz elő, ami viszont megváltoztatja az áramképet a test mögött, egy, a környezetnél kisebb nyomású zóna, az ún. leválási buborék alakul ki. A felületi nyomáseloszlás jellemzésére egy adott pontban a dimenziótlan nyomástényezőt használjuk (c_p), amelynek kiszámításához a pontbeli nyomás és a zavartalan áramláshoz tartozó statikus nyomás időben átlagolt különbségét elosztjuk a dinamikus nyomással.

$$c_p = \frac{p_{MEAN} - p_{\infty}}{\frac{\rho}{2} v^2}$$

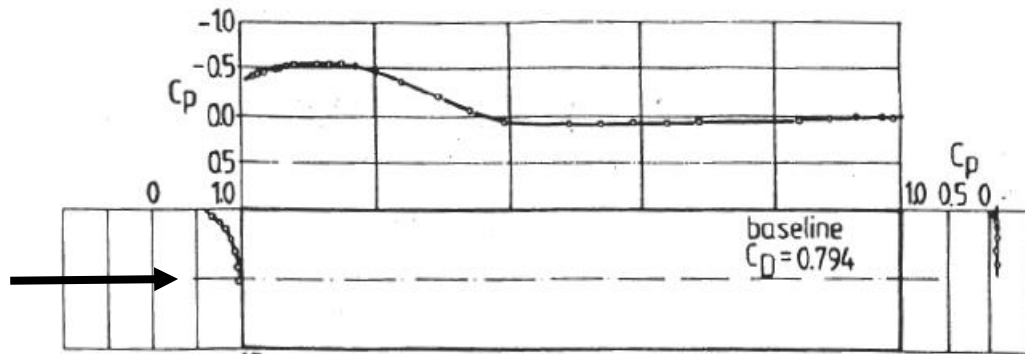
Sűrűdés nélküli (teoretikus) esetben egy henger felületén az áramlás irányára merőleges tengelyre szimmetrikus nyomástényező-eloszlás alakul ki (**6/b. ábra**, $c_p=1$ torlópont a megfúvás felőli és az azzal szemközti oldalon is!), ezért a testre áramlási eredetű ellenállásereő nem hat [5]. Sűrűdésos esetben a határreteg-leválás és a leválási buborék kialakulása miatt az ellenállástényező egy kerületi szöggel jellemzett felületi pont után már nem nő tovább, hanem egy negatív értéken közel stagnál. Az A henger körüli áramlás és így a nyomáseloszlás jellege függ a henger átmérőjével számolt Re számtól:

$$Re = \frac{vD}{\nu}$$

Kritikus Re szám felett a leválás hátrébb, nagyobb kerületi szög érték után következik be (**6/j. ábra**). Ebben az esetben lamináris helyett turbulens határreteg jön létre, amelyben intenzívebb az impulzustranszport a henger falára merőlegesen [1]. Így falhoz közel, a sűrűdés által lassított folyadékreszek tovább tudnak a növekvő nyomással szemben haladni, mivel mozgási-energia-utánpótlást kapnak a főáramból az intenzívebb transzport miatt. A határreteg turbulenssé tételel elősegítheti a henger felületének érdesítése vagy az ún. „botlasztó drót” használata, amellyel alacsonyabb Re számon bekövetkezik a lamináris-turbulens átmenet [2].



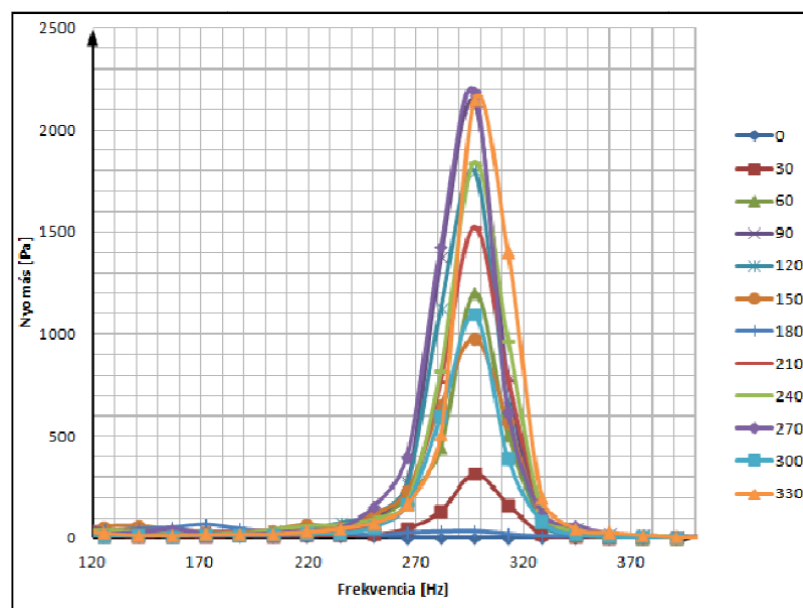
6. ábra: Balra: nyomástényező-eloszlás henger felülete mentén sűrűdés nélküli esetben; Jobbra: nyomástényező-eloszlás kritikus alatti és kritikus feletti Re számhoz tartozó esetekben



7. ábra: Nyomástényező-eloszlás téglalap keresztmetszetű hasábon

90 fokos megfúvási szögű, téglalap vagy négyzet keresztmetsztű testeknél az áramlás felőli oldalon a torlópont közelében pozitív, 1 körüli értékű nyomástényező alakul ki (7. ábra). Az áramlás felőli oldal éleihez közel az áramvonalak görbülete miatt nagy negatív értékű c_p -ket mérhetünk. Az oldallap jelentős részre és a hátlap egy kiterjedt leválási buborékon belül helyezkedik el, ezért általában ezen oldalak mentén az ellenállástényező alacsony negatív értékek közelében stagnál [3].

Bizonyos Re szám tartományokban ($10^3 \leq Re \leq 10^5$) a henger hátoldaláról felváltva örvények úsznak le (Kármán-féle örvénysor), amelyek egyúttal jelentős időbeli periodikus nyomásingadozást okoznak [2]. Erőteljes nyomásingadozásra lehet következtetni azokban a felületi pontokban, ahol nagy az időbeli átlagtól való négyzetes eltérés (RMS) értéke. A rögzített nyomás-időjelen a *Pressure and Force* szoftver beépített alkalmazásával azonnal gyors Fourier-transzformációt (FFT) végezhetünk. Megjeleníthetjük a harmonikus jelösszetevők amplitúdójának változását a frekvencia függvényében, és az eredményeket kimenthetjük szöveges adatfájlba is a további elemzés céljából. A jel amplitúdó-spektrumában általában az örvényleválás frekvenciáját a legnagyobb amplitúdójú csúcs jelzi (8. ábra), de gyakran több, ezzel összevethető csúcs is jelentkezik (a ventilátor és a mérőcsatorna nyomáslengései, elektromos zajok stb.)

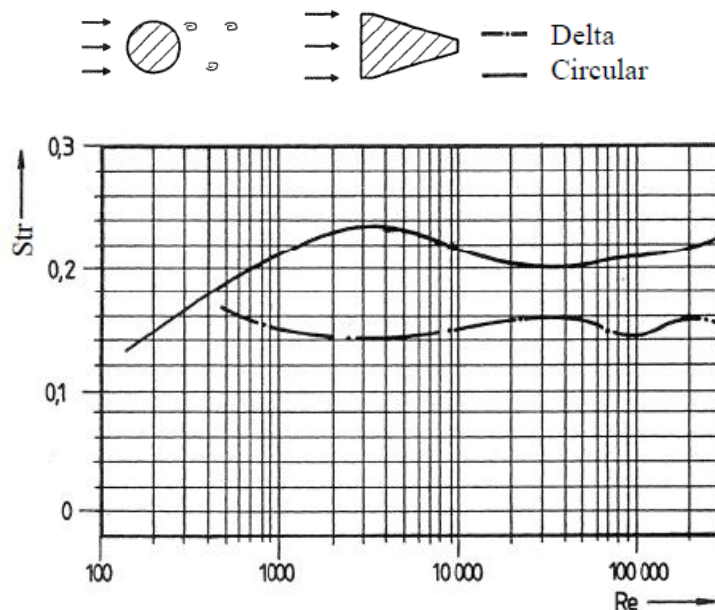


8. ábra Különböző kerületi szöghöz tartozó nyomásmérési pontokban mért nyomásjelek amplitúdó-spektruma

A periodikus örvényleválás okozta f frekvenciájú lengések jellemzésére használjuk a megfúvási v sebességgel és D hengerátmérővel (vagy L oldalhosszal) számolt dimenziótlan Strouhal-számot:

$$Str = \frac{fD}{v}$$

Tapasztalatok szerint a Strouhal-szám körlap és négyzetes keresztmetszetű hengereknél bizonyos Re szám tartományokban csak mérsékelten változik (**9. ábra**). Ezekben a tartományokban a leválási frekvencia ismeretében kiszámíthatjuk az áramlási sebességet, ezen az elven működnek pl. az iparban használatos, speciális, csővezetékbe beépíthető „vortex shedding” térfogatárammérők [6].



9. ábra Henger és a (térfogatárammérőknél használt) ún „delta test” örvényleválási frekvenciájából számított Str szám változása a Re szám függvényében

A periodikus örvényleválás miatti felületi nyomáslengések eredményeképpen a testre periodikusan változó erő hat. Ha a gerjesztő erőhatás frekvenciája a test valamelyik sajátfrekvenciája közelébe esik, az egyre nagyobb amplitúdójú lengéseket okoz (rezonancia), ami káros is lehet (hidak, tornyok „táncolása”), ezért bizonyos esetekben éppen a periodikus örvényleválás megakadályozása a cél. Erre szolgál pl. a henger mögött beépített „splitter plate” felszerelése, amelynek hatására a test mögött két stabil, ellentétes forgásirányú visszaáramlási zóna jön létre [2].

4. Lehetséges mérési feladatok

„A” Mérési feladat

Körhenger körüli nyomásmegoszlás és nyomáskülönbség-ingadozás mérése

- Végezzünk nyomásmérést a hengerpalást kerülete mentén nyomásmérési pont elforgatásával 10-15 fokként. Ismételjük meg a mérést 3-4 Re számhoz tartozó csatornasebességen!
- Ábrázoljuk a paláston mért nyomás-idősorok átlagából számított nyomástényező-eloszlást, valamint az időbeli nyomás-ingadozást jellemző négyzetes középértéket a kerületi szög függvényében az egyes Re számokhoz tartozó esetekben! Hasonlítsuk össze a nyomástényező-eloszlást a súrlódás nélküli esetet jellemző nyomáseloszlással, adjuk meg a leválás hozzávetőleges helyét!
- Ábrázoljuk a nyomásamplitúdó spektrális eloszlását néhány kerületi szöghöz tartozó mérési pontban az FFT mérési adatok alapján (ld. **8. ábra**). Ábrázoljuk a maximális amplitúdójú harmonikus összetevő frekvenciájával számolt Str szám eloszlását a kerületi szög függvényében!
- Néhány kerületi pontban, ahol nagy amplitúdójú nyomáslengések alakulnak ki, mutassuk be a Str szám Re szám függését!
- A mérés kiértékelése során kapott eredményeket igyekezzünk megmagyarázni, végezzünk irodalomkutatást a hengeres testek környezetében kialakuló áramlási jelenségekkel kapcsolatban!

„B” Mérési feladat

Nyomásmegoszlás és nyomásingadozás mérése négyzet alapú henger felületén

- Végezzünk nyomásmérést a kialakított nyomásmérési pontokban négyzet keresztmetszetű hasáb mind a négy oldala mentén közepes csatornasebességen, a megfúvási szög legyen 90 vagy 45 fok! Válasszunk ki egy nyomásmérési pontot, ahol nagy a nyomásingadozást jellemző négyzetes középérték (RMS)! Ebben a pontban végezzünk újabb nyomásméréseket 5-10 csatornasebességhez tartozó Re számon!
- Ábrázoljuk közepes csatornasebességnél az oldalakon mért nyomás-idősorok átlagából számított nyomástényező-eloszlást, valamint az időbeli nyomás-ingadozást jellemző négyzetes középértéket a hasáb kerülete mentén! A nyomástényező eloszlást hasonlítsuk össze négyzetes keresztmetszetű tompatestek körüli nyomástényező-eloszlással!
- Ábrázoljuk a nyomás-amplitúdó spektrális eloszlását néhány kerületi pontban az FFT mérési adatok alapján. Ábrázoljuk a maximális amplitúdójú harmonikus összetevő frekvenciájával számolt Str szám eloszlását a kerület mentén!
- A kiválasztott kerületi pontban ábrázoljuk a Str szám Re szám függését!
- A mérés kiértékelése során kapott eredményeket igyekezzünk megmagyarázni, végezzünk irodalomkutatást!

„C” Mérési feladat

Örvényleválás csökkentése „splitter plate” segítségével

- Végezzünk nyomásmérést a körlap alapú hengeren a 90 fokos kerületi szöghöz tartozó mérési pontban 5-10 megfúvási sebességhez tartozó Re számon! A további mérésekhez válasszuk ki azt a Re számhoz tartozó csatornasebességet, amellyel a legnagyobb, nyomásingadozást jellemző négyzetes középérték adódik! A kiértékelés során ábrázoljuk a legnagyobb amplitúdójú harmonikus összetevő (FFT adatok) frekvenciájából számolt Str számát a Re szám függvényében!
- Végezzünk nyomásmérést a hengerpalást kerülete mentén nyomásmérési pont elforgatásával 10-15 fokként a kiválasztott Re számon, „splitter plate” nélkül és azt felszerelve is. Ábrázoljuk a paláston mért nyomás-idősorok átlagából számított nyomástényező-eloszlást, valamint az időbeli nyomás-ingadozást jellemző négyzetes középértéket a kerületi szög függvényében „splitter plate” nélküli és „splitter plate”-el ellátott esetben is!
- Ábrázoljuk a nyomásamplitúdó spektrális eloszlását néhány kerületi szöghöz tartozó mérési pontban az FFT mérési adatok alapján (ld. pl **8. ábra**) a „splitter plate”-el ellátott és az anélküli esetben!

Irodalom

- [1] Dr.Lajos Tamás: Áramlástan alapjai (2004) 9.3.3 fejezet
- [2] Dr. Lajos Tamás: Áramlástan alapjai (2004) 11.1.2 fejezet
- [3] Dr. Lajos Tamás: Áramlástan alapjai (2004) 11.2.2 fejezet
- [4] Dr. Gruber József, Dr. Blahó Miklós: Folyadékok mechanikája (1973) 355-357 oldal
- [5] Dr. Gruber József, Dr. Blahó Miklós: Folyadékok mechanikája (1973) 279-280 oldal
- [6] Dr. Vad János: Advanced Flow Measurement 91-93 oldal