

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÁRAMLÁSTAN TANSZÉK



BSc M01 MÉRÉSI SEGÉDLET
TOMPA TESTEK ELLENÁLLÁSTÉNYEZŐJÉNEK
VIZSGÁLATA

Érvényes: 2021/22. tavaszi félév

1. Otthoni felkészülés

1.1. A mérés célja

Különböző, de valamilyen tulajdonságuk szerint összehasonlítható tompa testekre különböző sebességeken ható ellenállás-erők meghatározása méréssel, melyekből az ellenállás-tényező Reynolds-számtól és az összehasonlított tulajdonságtól való függése megismerhető. (A „tompá” azt jelenti, hogy rövid a vastagságához képest. Ekkor a közegellenállási erő főleg a test előtt-mögött felépülő nyomáskülönbségből származik, míg a test oldalán fellépő csúsztatóerők elhanyagolhatók. >>> nyílvessző)

1.2. Felkészülés a mérésre

A mérésre való felkészüléshez, elméleti alapjainak megértéséhez és a mért eredmények összehasonlításához **ajánljuk a tankönyv (Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai) 11.1-11.3 leckéinek tanulmányozását.**

A mérési útmutató alapos áttanulmányozása után **készítsük el a mérési munkatervet táblázatokkal, amelyekbe a mérendő adatokat rögzíthetjük.** Ez majd hasznos lesz azért is, mert az idő rövid lesz, és jó, ha látjuk, hol is tartunk, és segít, hogy ne maradjon ki semmi.

1.3. Elméleti összefoglaló

A folyadékáramlásban lévő, áramlásnak kitett testekre (pl. épületre, járművekre) áramlási eredetű erő hat. Ezen erőnek a zavartalan áramlás irányával párhuzamos komponensét **ellenállás-erőnek** nevezzük. Az ellenállás-erő az áramlási sebességtől, a test méretétől és a test alakjától a négyzetes ellenállástörvény szerint függ:

$$F_e = \frac{\rho}{2} v^2 c_e A$$

v a zavartalan áramlás sebessége, benne a $\frac{\rho}{2} v^2$ csoport pedig definíció szerint a dinamikus nyomás:

$$p_{din} = \frac{\rho}{2} v^2$$

Az ellenállás-erő tehát egyenesen arányos a dinamikus nyomással, ezen kívül a test jellemző felületével, és a dimenziótalan ellenállás-tényezővel:

$$F_e = p_{din} c_e A$$

A test jellemző felülete tompa testeknél a test áramlásra merőleges vetületének területe. A tapasztalatok és elméleti megfontolások szerint a különböző tompa testek ellenállás-tényezője az általunk vizsgálandó sebesség- és mérettartományban a test pontos alakjától, zavartalan áramláshoz viszonyított szöghelyzetétől, felületi érdességétől valamint a Reynolds-számtól függ:

$$c_e = f(\text{alak, helyzet, érdesség, } Re)$$

A Reynolds-szám dimenziótlan csoport, melyet a áramlási sebességgel (v), a test jellemző méretével (L) és az áramló folyadék sűrűségével (ρ) ill. dinamikai viszkozitásával (μ) alkotunk:

$$Re = \frac{vL\rho}{\mu}$$

Ezekből a két anyagállandót szokás összevonni és kinematikai viszkozitásnak (ν) nevezni:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

A dinamikai viszkozitás arról szól, hogy mekkora nyíróerővel szegül ellen a folyadék adott sebességnyrásnak. Ekkor nem kap szerepet a folyadék tehetetlen tömege. (hiszen nem kell gyorsítani).

A kinematikai viszkozitás viszont behozza a képbe a tehetetlen tömeget is. Affélét jellemez, hogy pl. egy megzavart folyadékban adott méretű örvények milyen gyorsan csengenek le, ha magára hagyják.

A levegő jó közelítéssel ideális gáz. Azok dinamikai viszkozitás pedig lényegében nyomásfüggetlen, de gyökösen nő az abszolút hőmérséklettel. Levegőre lényegében $18.2E-6 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 20°C -on.

Levegő esetén a sűrűséget az ideális gáztörvényből kaphatjuk.

$$\rho = \frac{p_0}{R_{\text{air}} T}$$

p_0 : a statikus nyomás, kb 100kPa , a labor falán lévő műszerről a pontos érték leolvasható

T : abszolút hőmérséklet. (a labor falán nagy üveghőmérő mutatja $^\circ\text{C}$ -ban)

R_{air} : a **levegőre vonatkozó specifikus gázállandó**, értéke $287.1 \text{ J}/(\text{kg K})$

Ne tévesszük össze az egyetemes gázállandóval ($8.3144626 \text{ J}/(\text{mol K})$), ami mol-onként (azaz $6e23$ db molekulánként) gondol a gázra, míg a specifikus gázállandó kg-onként. A kettő közötti váltás az adott gáz moltömege, ami levegő esetében $0.02896 \text{ kg}/\text{mol}$.

1.4. A mérőberendezés leírása

1.4.1. A mérőkocsi. A dinamikus nyomás mérése és beállítása

A levegőáramot egy nyitott mérőterű hordozható szélcsatornával hozzuk létre. A kilépő levegő egyenletes sebességeloszlását a kilépőnyílás előtt elhelyezett konfúzor, szűrőréteg és egyenletesítő rács biztosítja.

A konfúzor előtt és a kilépő keresztmetszeténél egy-egy nyomáskivezetés kapott helyet, ezekhez kell csatlakoztatnunk a nyomásmérő műszerünket. Az itt mérhető nyomás ideális esetben megegyezne a dinamikus nyomással (ott, ahová majd a testeket tesszük). A valóság kicsit más. Az elődök gondos mérésekkel megállapították az összefüggést a mérőkocsi csöcsönkjai között mérhető és a kilépő keresztmetszet közepén 140mm magasan mérhető dinamikus nyomás között:

$$p_{\text{din}} = K\Delta p, \quad K = 0.908$$

Ezt használhatjuk mi is a dinamikus nyomás kiszámítására.

A dinamikus nyomást a ventilátor szívóoldali fojtásával szabályozzuk. A fojtás mechanizmusa a kocsi tetején lévő plexiablakon keresztül látható, oldalt egy kerékkel kézzel állítható. A fojtás a szívó keresztmetszet előtt mozgatható körlappal van megoldva, melyet egy orsós mechanizmuson keresztül állíthatunk. Teljesen elzárva közel 0 Pa -t tudunk beállítani, míg a keresztmetszetet folyamatosan nyitva a kerék első 10 fordulatával a nyomás drasztikusan növekszik a maximális érték 90% -áig, további 8 fordulattal lassan nő a teljesen nyitott helyzetig.

A kerék **különösebb erőfeszítés nélkül** mozgatható. Nagyon figyeljünk arra, hogy a végállások közelében **ne feszítsük túl** az orsót, mert valami eltörhet! (a vízcsaphoz hasonlóan működik: jobbra tekerve zár)

1.4.2. Az erőmérő

A testeket a méréshez fel kell szerelni az erőmérőre. A mérőszár végén a M5 orsót betekerjük a test menetes furatába és az anyával rákontrázzuk. A mérőszár másik végét az erőmérő végére illesztjük, ahol azt egy kis neodímium mágnes megtartja. Az egész úgy van kialakítva, hogy a művelet egyszerű legyen, de az erőmérőt ne tudja túlterhelni egy véletlen rossz mozdulat. Attól ugyanis az erőmérő tönkremehet, vagy esetleg csak elállítódik a nullája, és jó időbe telik, mire a nagy pofon után „megnyugszik”.

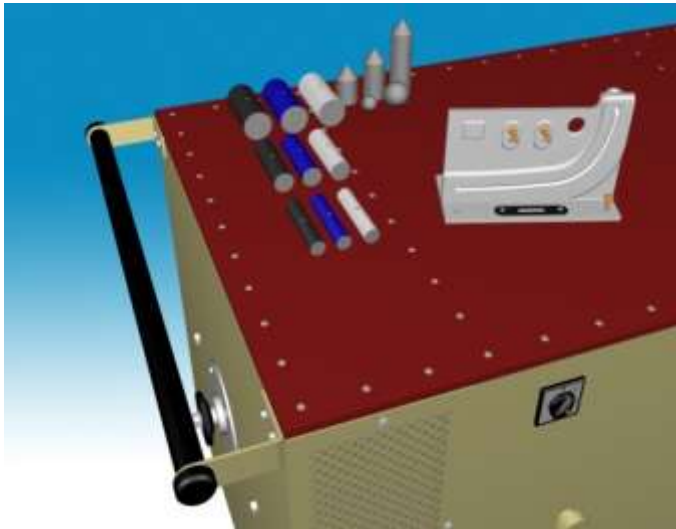
Az erőmérőt egy burkolat védi a szélétől. Az egész úgy van kialakítva, hogy mérési eredmény minél pontosabb lehessen. Lehetséges hibaforrások:

- Az erőmérőbe is belekap a szél, annak az ereje is megjelenik az eredményben. Ennek kizárására szolgál a burkolat.
- Az erőmérő(+burkolata) a vizsgált test közelében van, így maga is belezavar az áramlási térbe, amivel módosítja az erőt. Ezt csökkentendő helyeztük az erőmérőt a test mögé, attól tisztas távolságra. (hosszú szár tartja a mérendő testet)
- A hosszú mérőszár nincsen burkolva, sajnos arra is hathat szélérő. Ezért a mérőszár vékony, sima, és a széllel (ill. az erőmérő érzékenységi irányával) párhuzamosan áll. Továbbá a szár a testnek a szélárnyékában van. Ezekért reméljük, hogy az így elkövetett hiba kicsiny lesz. Megjegyzendő, hogy a hibát a szár burkolásával (egy csővel) is lehetne csökkenteni. Azonban, ha a cső vékony, könnyen hozzáérhet a benne futó szárhoz, ami hatalmas hibát okozhat. Ha viszont a cső vastag, akkor meg az zavar bele az áramlási térbe.

Az erőmérőt gyakorta kell nullázni (ellenőrizni), mert a nullája enyhén mászkálhat.

Mivel a vizsgált áramlások turbulensek, így az erőjelen is tapasztalható egy ingadozás. Ennek a csökkentésére hosszú csúszó átlagolás van az erőmérő mikroprogramjában beállítva.

A csúszó átlag azt jelenti, hogy jelen esetben tized másodpercenként mér egy-egy adatot, azokat egy idősorba illeszti, és mindig a legfrissebb N darab mintának a lineáris átlagát teszi a kijelzőre.



1. ábra Mérőkocsi, mozgatható szélcsatorna



2. ábra Erőmérő állvány a róla lelógó mérőszárral és rajta egy hengerrel. A fényes cső a szélvédő burkolat, azon belül van az erőmérő cella.



3. ábra Hengeres test a mérőszáron. A szár bal oldali végére ragasztott acélalkatrész a mágneshez való stabil csatlakozást, ugyanakkor a kibillenthetőséget is biztosítja.

2. A mérés menete

2.1. Alapadatok felvétele

A kiválasztott testek alakját, méreteit, érdességi jellemzőit, az alkalmazandó megfűvási irányt jegyzeteinkbe rögzítjük. A testek befoglaló méreteit tolmérővel mérjük le.

Feljegyezzük a **mérőeszközök (mérőkocsi, nyomásmérő, erőmérő cella) típusát, sorozatszámát**. A laborban elhelyezett fali műszerekről leolvassuk a **teremben uralkodó hőmérséklet és légnyomás** értékeit.

Az a jó, ha minden feljegyzendő számára üres rubrika van a mérési terven, így biztosan nem fogunk semmit kifelejteni.

2.2. Kalibrációk

A nyomásmérő kalibrálása: a digitális manométert odavisszük a Betz-féle mikromanométerhez. Mindkét műszer nullázzuk. Csatlakoztatjuk a pozitív bemeneteket. (ekkor a fecskendő legyen teljesen kihúzott állapotban)

A negatív bemenetekkel nem kell törődni, mindkét műszer referenciapontja a környezeti nyomás lesz.

Kalibrálás: 0 és a 500Pa között kb 100Pa-onként. Feljegyzendők az összetartozó értékek: h_{Betz} [mm] és p_{dig} [Pa] (1 vízoszlop mm \approx 10Pa)

Az erőmérő cella kalibrálása: nullázás után (szélcsendben) a rendelkezésre bocsátott mérőtömeget ráakasztjuk az erőmérőre és leolvassuk.

2.3. A kocsi beindítása és próbája, a maximális és minimális nyomás leérése.

Kössük a **nyomásmérőt** a mérőkocsi nyomáskivezetéseire, és **teljesen álló szélcsatorna mellett nullázzuk** azt. Fedetlen kifűvónyílás mellett indítsuk be a ventillátort. A fojtás kinyitásakor kinyitásával állítsuk be a maximális sebességet és jegyezzük fel az ehhez tartozó nyomáskülönbséget! (Ez fogja meghatározni a bejárható sebességtartományunk felső határát.)

A nyomásközlő szilikoncsöveket mérés előtt célszerű ellenőrizni, nehogy kis repedés, szakadás legyen rajtuk, mert ha szelel a mérőcső, a mérési adataink utólag is menthetetlenek. Kritikus pontok a műszerekre, ill. a nyomáskivezetésekre történő csatlakoztatás helyei. Az ellenőrzést szemrevételezéssel, vagy rögtönzött nyomástartási próbával végezhetjük el.

2.4. A mérési program elkészítése, célnyomások meghatározása

A kitűzött mérési feladat sebességek, illetve Re-számok azonosságát írja elő, helyben, a mérőkocsin viszont nyomás-értékeket mérhetünk. Ezért előre el kell dönteni és a táblázatban (annak első

oszlopában?) rögzíteni, hogy az adott mérési pontban milyen értéket kell majd látnunk a nyomásmérőnkön. (mindezt a testek méreteinek, stb. ismeretében) Ezt értjük most **mérési program** alatt. Ez segít majd jól haladni az adatok összegyűjtése során.

Az alábbiakban megadjuk a módját, hogy a sebességre, ill. Re-számokra vonatkozó előírásokból hogyan lehet a célnyomásértékeket meghatározni úgy, hogy a mérések a szélcsatorna nyomástartománya és a testek adatai alapján megvalósíthatóak legyenek. A tényleges sebességértékek, ill. Re-számok a kiértékeléskor fognak adódni.

- Megmérjük a maximális huzathoz tartozó mérőkocsi-nyomást.
- Ezt visszanyessük 90%-ra, hogy a legnagyobb huzatnál is maradjon némi szabályozási tartalék a rendszerben. Ez lesz a p_{\max} , a maximális torlónyomás.
- A p_{\max} -nak vesszük kb. a 16-od részét: (p_{\min} = a minimális torlónyomás).

Ebben a nyomástartományban fogunk dolgozni. A mérési tartományunk alját a félelmünk határozza meg, hogy a mért nyomás, esetleg a testen ébredő ellenálláserő süppedhet a zajba, mérési bizonytalanságba. (főleg a műszerek nullájának mászkálása miatt)

Ha elviseljük, hogy az alsó mérési pontok bizonytalanabbak lesznek, szabad próbálkozni alacsonyabb alsó határral is. pl $p_{\max}/25$, $p_{\max}/50$. >>> mennyire stabil a műszerek nullája? Mennyi a kijelzők felbontóképessége?

A p_{\max} , p_{\min} alapján a képletekkel kiszámítjuk a megfelelő huzatsebességeket. Ezekből, ha **adott sebéségen** kell mérnünk, akkor kiszámítunk közbül pár sebességértéket (függően, hogy hány sebéségnél kell mérnünk összesen). Azokból pedig visszszámoljuk a megfelelő torlónyomásokat, végül a mérőkocsi-nyomásokat. (Utóbbiakat kell majd a fojtás tekergetésével megcélozni.) **Mindig logaritmikus skálán** legyenek a pontok egyenlően elosztva. Vagyis a szomszédos értékeknek a *hányadosa* legyen állandó, ne a különbsége.

Ha viszont azonos Re-számok vannak előírva 3 különböző méretű testre, az kissé bonyolítja a dolgot. Legyen pl. 8 különböző Reynolds-szám! Akkor azt a legnagyobb és a legkisebb Re-számot kell kitalálni, amelyik mind a három testtel egyaránt megvalósítható. (= nem ütközünk bele sem a plafonba, sem a zajhatárba)

A testek méretével nő a Re-szám, ezért a Re_{\max} -ot a legkisebb testtel a legnehezebb elérni. Tehát Re_{\max} -ot a legkisebb mérettel és maxi huzattal számoljuk ki.

A Re_{\min} -hez értelemszerűen járunk el. (legnagyobb test – legkisebb huzat)

Az így kapott Re_{\min} és Re_{\max} közé választunk további 6db értéket, összesen tehát lesz 8, ezek a használandó Re-számaink. A hozzájuk tartozó sebességeket >>> torlónyomásokat >>> mérőkocsi-nyomásokat az ismert képletekkel visszszámoljuk. Összesen a $3 \times 8 = 24$ db különböző nyomás-célérték lesz a 24db sor elején az adatgyűjtő táblázatunkban.

2.5. Gyors ellenőrzés

Minden esethez kiszámítottuk azt a cél-nyomást, amelyet a nyomásmérőnkön majd látnunk kell. Akkor jó, ha célnyomások mindegyike Δp_{\max} és Δp_{\min} közé esik.

Mindenkinek joga van (esztétikai okokból) a majdani diagram vízszintes tengelyén megjelenő értékeken kissé kerekíteni. Csak arra vigyázzunk, nehogy emiatt kilógjunk a mérőkocsi teljesítőképességének felső határából.

2.6. A mérési program végrehajtása

A mérések táblázatában egy sor az alábbi adatokat tartalmazza:

A test alakja, sorszáma

A test jellemző mérete

A $\Delta p_{\text{cél}}$ mérőkocsi-nyomás célérték (előre beírva) [Pa]

A $\Delta p_{\text{mért}}$ mérőkocsi-nyomás mért (ami sikerült) [Pa]

A mért erőérték [N]

Javasolt műveleti sorrend egy test esetén:

(lentől haladunk felfelé)

Beállítjuk a fojtást a legkisebb huzathoz.

A csatorna kikapcsolása, megvárjuk, amíg megáll.

A test felszerelése az erőmérőre, a test pozícionálása a kifúvónyílás tengelyében.

A mindkét mérőműszert nullázzuk.

Csatorna bekapcs.

Stabilizálódásra vár, Műszerleolvasás+feljegyzés, új huzat beállítása, vár, műszerleolvasás..... stb.

A mérések végén jegyezzük föl ismét a légköri hőmérséklet és nyomás értékét.

Mire figyeljünk a mérés során?

Munkavédelem:

Ne próbáljuk meg a bekapcsolt szélcsatorna szelét a fedéllel elterelni, lefedni, mert nem fog sikerülni, és balesetveszélyes!

Az asztal felületén csak a legszükségesebb dolgokat helyezzük el! Az asztalon ne hagyjunk írószert, vagy egyéb apró tárgyakat szabadon, amelyek a légáram által elsodorva leeshetnek, vagy sérülést okozhatnak!

Nyomásmérés hibalehetőségei

Győződjünk meg róla, hogy azt a csatornát olvassuk le, ami be van kötve! Ellenőrizzük a műszer helyes bekötését!

Érdemes megnézni minden nullázáskor, hogy az előző nullázás óta mennyit mászott a készülék nullája. Ezt figyelembe lehet venni a mérési bizonytalanság kiszámításánál (felülbírálv a kincstári alapadatokat) .

Erőmérés hibalehetőségei

Ne feledjük test-cserekor nullázni az erőmérőt, mert a testeknek eltérő a súlya!

Győződjünk meg róla, hogy mérleg (mérési bizonytalanságon belül) tökéletesen álló szélcsatorna mellett 0 N-t mutat!

Mivel a kikapcsolt szélcsatorna csak lassan áll le (mi pedig türelmetlenek vagyunk), ilyenkor megtehetjük, hogy a már alig mozgó ventilátor mellett a maradék huzatot eltereljük vagy egy merev lappal (pl. mappával) egyszerűen betapasztjuk a szélcsatorna száját.

A nyomások beállításánál és feljegyzésénél hasznos:

A táblázat (első?) oszlopába már beírtuk a mérési program szerinti célnyomást. A beállításnál nem kell halál-pontos értékhez ragaszkodni, mert sohase leszünk kész. És felesleges is. Úgyis fel kell jegyezzük a megvalósuló értéket.

Azt általában tudni lehet, hogy a tervezettől kissé elérő huzat kb. **ugyanolyan arányban** téríti el a mért nyomást és az erőt. A kiértéklés során ezek hányadosa lesz a lényeg.

Ugyanakkor a majdani diagramra a pöttyöt (vízszintes értelemben) tehetjük a közös névleges/kerek/cél-értékhez, csalva ezzel egy picit. Mert a mi testjeink C_e -je csak gyengén változik a sebességgel vagy a Re -számmal. 1-2% eltérés vízszintesen még nem okoz észrevehető változást a görbén.

(A beállítás nagy nyomásoknál 5 Pa-on belül, kis nyomásoknál akár 1 Pa-on belül megoldható. Ne feledjük: a huzat csak 5-10 másodperc után áll be a fojtás eltekerése után.)

2.7. Ellenőrzés

Ellenőrizzük a feljegyzett adatokat, ne legyen közöttük hiány vagy első ránézésre is gyanús érték.

Ellenőrizzük, hogy a célértékek és a megvalósított értékek között ne legyen durva eltérés.

Milliméterpapíros diagram:

A milliméterpapírra egy diagramban ábrázoljuk az összes erőmérőn leolvasott értéket a leolvasott nyomás függvényében. A pontoknak testenként különböző meredekségű, de az origóból induló (majdnem)egyenes¹ vonalakra kell illeszkednie. A durva hibák ezzel kiszűrhetők: például: egy számjegy elírása, a erőmérő nullázásának elfelejtése, ezáltal súlyerő belemérése.

2.8. Rendrakás

A jegyzőkönyv kézzel írott formájának átadása a mérésvezető oktatónak.

A mérésvezető oktató ellenőrizheti a mérőstandhoz tartozó eszközök leltárját.

A **kézzel írott jegyzőkönyv** követelményei:

A címloldalon szerepeljen a mérés címe, időpontja és a dátum, a mérést végző hallgatók neve, neptun kódja!

Minden lapon szerepeljen oldalszám és dátum, valamint a mérésvezető oktató neve!

Minden olyan lap, amin olyan információ (mért adat, vázlat, képlet) szerepel, amit később a kiértékelés során használni fogunk, a jegyzőkönyv része kell, hogy legyen, beleértve a címloldalt és a milliméterpapíros diagramot is!

Többszörösen leírt adatokat (piszkozatot) tartalmazó papírokat nem kell beadni.

A jegyzőkönyv elfogadásakor a mérésvezető oktató minden beadásra rendezett oldalt aláír.

¹ Azért csak „majdnem”, mert ha teljesen egyenes lenne, az azt jelentené, hogy a C_e független a Re -számtól. Ami nem teljesen igaz a mostani békés-és-szűk Re -tartományokban sem. Általában még még kevésbé.

3. Kiértékelés

3.1. A mérési feladat kiértékelése

1. táblázat. Testek mért és származtatott geometriai adatai.

2. táblázat. A környezeti állandók kiszámítása: a mérés kezdetén és végén felvett adatok számtani átlagai alapján kiszámítjuk a levegő sűrűségét és viszkozitását. Táblázatban rögzítjük az eredményeket.

3. táblázat. A nyomásmérő kalibrálása: A nyers adatok feltüntetése után a Betz-manométeren leolvasott vízoszlopértékeket számítsuk át Pa-ra:

$$\Delta p_{\text{Betz}} = \rho_{\text{víz}} g h_{\text{Betz}}$$

Ezen értékeket diagramon ábrázoljuk a digitális nyomásmérőn leolvasott értékek függvényében. **Regressziós egyenest fektetünk a pontokra a diagramon és kiíratjuk az egyenes egyenletét:**

$$\Delta p_{\text{Betz}} \cong k_p \Delta p_{\text{dig}} + \Delta p_{0\text{dig}}$$

Mivel a nyomásmérő műszeren azonnali nullázási lehetőség van, amit a mérés elején, sőt akár közben is többször használtunk, ezért a regressziós egyenes $\Delta p_{0\text{dig}}$ konstans tagja nem informatív számunkra. A regressziós egyenes k_p meredekségét viszont a továbbiakban a digitális nyomásmérőnk kalibrációs tényezőjének tekintjük. (Amivel azonban nem muszáj bajlódni, ha a hibája 2%-on belül van.)

4. táblázat. Az erőmérő kalibrálása: a kalibrációs tömeg számított súlyának és a mért értékek átlagának hányadosa a mérleg kalibrációs tényezője:

$$k_F = \frac{mg}{\frac{1}{n} \sum F_{\text{dig},i}}$$

(az n arról szól, hogy hányszor próbáltuk ki)

5. Táblázat. A mérések feldolgozásának táblázata.

Célszerű az összes mérési adat feldolgozását egyetlen, nagy táblázatba foglalni, így a cellahivatkozások a lehető legegyszerűbben kezelhetők.

Célszerű úgy rendezni az adatokat, hogy egy testtel, egy sebességen mért mérési adatok és a feldolgozásukból származó összes adat egy sorban legyen.

Egy testhez tartozó adatokat közvetlenül egymás alá célszerű rendezni, sebesség szerint növekvő sorrendben, így a diagramok megadása és az átláthatóság a legjobb.

Egy sor a következő oszlopokat tartalmazza (a mennyiség kiszámítását lásd alább):

- Test megnevezése, kvalitatív mérete (nagy, közepes, stb.);
- a célnyomás értéke, (tulajdonképpen „névleges” nyomás
- a megvalósult leolvasott nyomásérték,
- a megvalósult leolvasott erőérték,

- Dinamikus nyomás
- Sebesség
- Ellenálláserő mért
- Ellenálláserő kalibrálás után
- a test jellemző mérete,
- Reynolds-szám
- a test jellemző felülete,
- ellenállás-tényező

Végül ugyanebben a sorban a hibaszámítás is:

- a hibaszámításhoz szükséges adatok, tagok (több oszlopban)
- az ellenállás-tényező abszolút hibája
- az ellenállás-tényező relatív hibája

A dinamikus nyomás (avagy torlónyomás) a szélcsatorna mérőállandójával a közvetlenül mért nyomásból számolható:

$$p_{din} = K \Delta p, \quad K = 0,908$$

(De ha a digitális nyomásmérő hibája 2%-nál nagyobb, akkor még azt is illik figyelembe venni.)

Az ellenálláserő:

$$F_e = C_{\text{fact}} \cdot F_{\text{erőmérő}} \cdot F_{\text{leolvasott}}$$

A sebesség, Reynolds-szám és ellenállás-tényező a fentiekből az alapképletekkel számolható. Az ellenállás-tényezőnél közvetlenül használjuk a dinamikus nyomás számított értékét.

A hibaszámításhoz lásd a függelékét.

1. diagram. A nyomásmérő kalibrációja.

2. diagram. A számított ellenálláserők a számított dinamikus nyomás függvényében.

3. diagram. A számított ellenállástényező-értékeket közös diagramon.

Minden testre külön adatsorral ábrázoljuk a Reynolds-szám függvényében. Szintén fel kell tüntetni az ellenállás-tényezők abszolút hibáit fel- és lenyúló hibasávokkal vagy a hibaértékekkel felfelé és lefelé eltolt adatsorok feltüntetésével.

Értékelés.

Értelmezzük a kapott eredményeket az elmélet alapján, megállapításainkat rögzítsük a jegyzőkönyvben, adjuk elő a prezentáción. Vessük össze eredményeinket a tankönyvben található értékekkel, vagy egyéb irodalommal. Külön értékeljük a számított hibáknak a következtetéseink bizonytalanságára gyakorolt hatását.

Az ellenállás-tényező hibaszámítása

A hibaterjedés számításakor az egyszerűség kedvéért már a kalibrált adatokból induljunk ki.

A korábban megállapított összefüggések szerint:

$$c_e = \frac{F_e}{\frac{\rho}{2} v^2 A} = \frac{F_e}{p_{din} A} = \frac{F_e}{K \Delta p A}$$

Feltételezzük, hogy a kiemelt konstans-csoportban, illetve a test mért jellemző keresztmetszetében (továbbá a kalibrációs tényezőkben) elhanyagolható a mérési hiba. Ekkor az ellenállás-tényező, mint számított eredmény két független mennyiség függvénye:

$$c_e = f(F_e, \Delta p)$$

Ahol:

F_e a mért ellenálláserő

Δp a mért nyomáskülönbség

Tehát a parciális deriváltak meghatározásakor a fenti változók szerint kell deriválni az alábbi függvényt:

$$f(X_1, X_2) = \frac{F_e}{\Delta p K A}$$

A fenti mennyiségek abszolút hibáiként az alábbi értékek vehetők föl:

$$\delta \Delta p = 2 \text{ Pa}$$

$$\delta F = 0.0004 \text{ N}$$

SZABAD MÓDOSÍTANI !!!!!

A feltüntetett értékek a nyomásmérőnek és az erőmérőnek a megbízhatóságát jelentik.

De ezek módosulhatnak a mérés során tanúsított gondosság és a „szerencse” függvényében.

Módosítást indokolhat, hogy a turbulens áramlásban a mért mennyiségek ingadoznak.

Nagy huzatoknál az ingadozás miatti bizonytalanság messze meghaladhatja a mérőműszerek bizonytalanságát. (Ami általában a nullhiba mászkálásából, a kijelző felbontásából és az érzékenység bizonytalanságából tevődik össze. Ez 2db additív érték és egy szorzófaktor.)

Nem kötelező (mert van a jegyzőkönyvvel elég teendő anélkül is), de szabad célul kitűzni, hogy a hibaszámítás realisabb legyen, ne valóságtól elrugaszkodott, hasraütésszerű hibasávokat adjon.

Mindent szabad, csak a döntéseinket le kell írni, esetleg meg is indokolni. (röviden, lényegretörően)