

VORTEX ÁRAMLÁSMÉRŐ KALIBRÁLÁSI TAPASZTALATAI

CALIBRATION EXPERIENCES ON A VORTEX FLOW METER

Fenyvesi Bence

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék

ABSTRACT

The paper presents the diagnostic investigation of the effects of non-linear behavior caused by the main measurement principle of vortex-shedding flow meters. The investigation is presented in detail. This includes the start to finish design and building of the calibration equipment, the description of the diagnostic method and the processing of the acquired data. The presented calibration method and the built equipment can be applied to several kinds of flow meter calibrations, it is not restricted to the case under investigation. The investigations could be deepened by applying numerical simulations.

1. BEVEZETÉS

Az örvényhagyó elven működő vortex áramlásmérők széles körben alkalmazhatóak cseppfolyós, illetve gáz/gőz közegek térfogatáramméréséhez.

A műszer áramlástechnikai elve, hogy ha egy testet olyan áramlásba helyezünk, amelynek jellemző Reynolds-száma egy adott tartományon belülre esik, akkor a testről Kármán-féle örvénysor úszik le. Ezen örvények leválási frekvenciája hozzávetőlegesen egyenes arányosságban van a közeg sebességével, ezáltal pedig a térfogatárammal is. Az örvényleválási jelenség jellemzéséhez szükség van a Strouhal-, illetve a Reynolds-számra, melyek alakja a következő:

$$Str = \frac{f \cdot d}{u} \quad (1)$$

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} \quad (2)$$

Str ismerete és f mérése alapján számítható az u sebesség. A módszer kritikus pontja a Strouhal-szám értékének változékonysága a vizsgált Reynolds-szám tartományon. Ideális esetben, a Strouhal-szám Reynolds-szám függetlensége esetén, idealizált – tökéletesen lineáris karakterisztikájú – áramlásmérő műszer lenne kialakítható, amely az örvényleválás f frekvenciájával tökéletesen arányos térfogatáram-adatot szolgáltatna a teljes mérési tartományon.

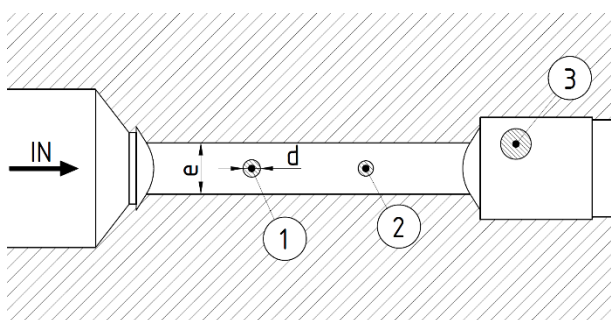
Vizsgálataim motivációja: kalibrációs esettanulmány végzése ipari vortex áramlásmérőn, a műszer nemlinearitásának kritikai elemzése, és ez által a $Str(Re)$ összefüggés részleteinek feltárása.

JELÖLÉSJEGYZÉK

A	$[m^2]$	áramlási keresztmetszet
D	$[m]$	keresztmetszet magassága
d	$[m]$	örvényhagyó elem jellemző mérete
Δ	$[-]$	eltérés
e	$[m]$	keresztmetszet szélessége
f	$[Hz]$	örvényleválási frekvencia
m	$[-]$	tömeg
Q	$[m^3/s]$	térfogatáram
Re	$[-]$	Reynolds-szám
Str	$[-]$	Strouhal-szám
t	$[s]$	idő
T	$[^\circ C]$	hőmérséklet
u	$[m/s]$	áramlási sebesség
ν	$[m^2/s]$	kinematikai viszkozitás
ρ	$[kg/m^3]$	sűrűség

E vizsgálatok hozzájárulhatnak más olyan jelenségek mélyebb megértéséhez is, melyekben az örvényleválás kulcsszerepet játszik. Ilyen jelenség a ventilátor-lapátok, szárnymetszetek örvényzaja [1], mely az Áramlástan Tanszék egyik kutatási témája. Az örvényzaj frekvenciáját befolyásolhatja a szárnymetszetre jellemző $Str(Re)$ trend.

Az esettanulmányul választott műszer áramlási terének geometriáját a gyártói katalógus [2] tanulmányozásával, illetve saját mérések elvégzésével állapítottam meg. Az áramlási tér vizsgálat szempontjából lényeges részének egy – hossz tengelyre merőleges – metszete az 1. ábrán látható.



1. ábra: A vortex áramlásmérő belső áramlási terének felépítése

Az „e” szélességű (nem hengeres keresztmetszetű) mérőszakaszban található az (1), áramlásba helyezett örvényhagyó elem. Az arról leváló örvények leválási frekvenciáját a (2) szenzorral mérve – a Strouhal-szám elhanyagolható változását feltételezve – az eszköz meghatározza az áramlási sebességet, majd ez alapján jelzi ki a térfogatáramot.

Az műszerben a mérőszakasz után található egy hőmérséklet-szenzor is (3), továbbá a kimeneti szakaszon egy szelep helyezkedik el, amellyel az átengedett térfogatáram pontosan beállítható.

Fontos továbbá megjegyezni, hogy az örvényhagyó elem geometriája a gyártó kizárólagos tulajdona, így ipari titoknak

minősül. Ezért jelen cikkben az elemet egy szimmetrikus körhengernek feltételezve végzem el a szükséges vizsgálatokat.

2. PROBLÉMAFELVETÉS, CÉLKITŰZÉS

Az áramlásmérő gyártó által dokumentált pontossága a [3] katalógusban szerepel. Kérdésként merül fel, hogy ebben a pontossági korlátban mekkora szerepet játszik a feltételezett nemlinearitás, mely a Strouhal-szám Reynolds-szám függésének tulajdonítható. Ennek vizsgálatára egy, a mérőműszer dokumentált pontosságánál jelentősen nagyobb pontosságú kalibrációs mérésre van szükség. E mérés megmutatja azt is, hogy adott műszer eseti kalibrációjával megvalósítható-e a [2] szerint dokumentálnál nagyobb mérési pontosság.

Mivel a vortex áramlásmérők alkalmazásának alapja a Strouhal-szám állandósága az adott Reynolds-szám tartományon, ezért fontos e feltétel teljesülését ellenőrizni.

A témával foglalkozó szakirodalmi forrás [3] utal rá, hogy a Strouhal-szám Reynolds-számtól való függetlensége csak közelítőleg valósul meg, bár hozzáteszi, hogy az ebből adódó nemlinearitási hiba viszonylag kicsi.

Jelen cikk a fenti kérdésfelvetésre kíván választ adni, kalibrációs mérések és azok kiértékelése révén. A vizsgálat magában foglalja a kalibráló berendezés megtervezését, megépítését, a mérések kivitelezését és a kapott adatok vizsgálati célból történő feldolgozását. Az adatfeldolgozás és kiértékelés a következő szempontok szerint történik:

- 1) Kalibrációs diagramok felvétele, azok nemlinearitási vizsgálata, lineáris trendvonal-illesztés révén, a legkisebb négyzetek módszerével.

2) A nemlinearitás részletesebb feltárása érdekében a műszert jellemző $Str(Re)$ trendek származtatása. E trendek összehasonlítása a szakirodalomban fellelhető adatokkal [3], körhengerre és ún. delta-idomra vonatkozóan. A trendek jellegzetességeinek megállapítása.

3) A $Str(Re)$ trendnek megfelelő nemlinearitás összevetése a műszer katalógusban dokumentált pontosságával. Annak megállapítása, hogy a műszer eseti kalibrációja révén milyen mértékben fokozható a mérési pontosság, melyet ezek után alapvetően már csak a $Str(Re)$ trend korlátoz.

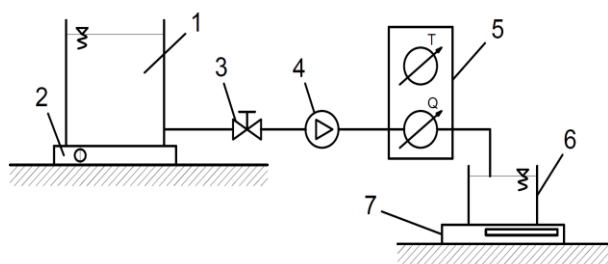
3. KALIBRÁLÓ BERENDEZÉS TERVEZÉSE ÉS KIVITELEZÉSE

A kalibráló berendezés tervezéséhez elengedhetetlen a kalibrálandó műszer alapos megismerése.

A vizsgálandó műszer kalibrátor-tervezés szempontjából leglényegesebb adatai [2]:

- térfogatáram-mérési tartomány: $0,5 - 4$ liter/perc
- a műszer hidraulikai ellenállás görbéjének ismerete (a maximális mérhető térfogatáramon a nyomásesés $0,04$ MPa)
- gyártó által szavatolt mérési pontosság: ± 3 %, a teljes mérési tartományra vonatkoztatva

A fenti tulajdonságok figyelembe vételével, a szükséges hidraulikai számítások elvégzése után, a 2. ábrán vázolt kalibráló berendezést terveztem meg.



2. ábra: A kalibráló berendezés felépítése

Az (1) tartályból biztosított a mérőfolyadék utánpótlása. Fontos a lehetőleg nagy átmérőjű tartály alkalmazása, hogy a vízszintváltozásból adódó nyomáscsökkenés által okozott hiba minimális legyen. A közeg hőmérsékletének pontos beállítását a (2) fűtőelem végzi el, a tartály után a térfogatáram szabályozásáról pedig a (3) szelep gondoskodik. A tartálybeli mérőfolyadékot a (4), frekvenciaváltóval is felszerelt szivattyú áramoltatja. A tartály és a szivattyú szintkülönbsége $0,7$ m. A szivattyú a közeget a beállított térfogatárammal átáramoltatja az (5) kalibrálandó műszeren. A műszer után közvetlenül elhelyezkedő (6) tartályba kerül a közeg, melynek pillanatnyi tömegét a (7) precíziós mérleg méri.

A rendszer teljes hidraulikai ellenállása az elért maximális térfogatáramon 34 kPa, azaz $3,5$ vízoszlopméter, melyből a szivattyúnak $2,8$ vízoszlopmétert kell fedeznie. Az így kialakult munkapontban az áramlásmérőnél létrehozott maximális térfogatáram $3,2$ liter/perc.

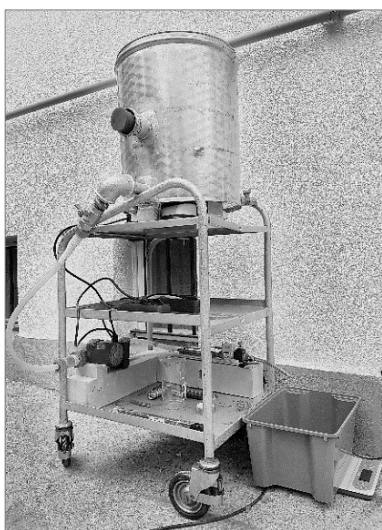
A mérési módszer a következő: A tartály feltöltendő a közeggel, mely jelen esetben a belső korrózió elkerülése érdekében desztillált víz. A kívánt hőmérséklet elérése után történik a szelep nyitása, majd a szivattyú bekapcsolása. Ezután beállítandó a térfogatáram, amely a szelepnitítás változtatásával és a szivattyú fordulatszámának szabályozásával tehető meg. Amikor állandósult az áramlás és a műszer felvette a közeg hőmérsékletét, indul a mérés. Ez a műszer által kijelzett térfogatáram leolvasását, illetve az átáramoltatott folyadék tömegének kilépési oldalon való mérését, valamint a kifolyási idő rögzítését jelenti.

Így a kalibráló berendezés által mért térfogatáramot a következőképpen számíthatjuk ki:

$$Q_{\text{mért}} = \frac{\Delta m}{\Delta t \cdot \rho_{\text{víz},T}} \quad (3)$$

A kalibrálási mérések során általános alapelv, hogy a kalibrálási módszernek legalább kétszer-háromszor, ideális esetben egy nagyságrenddel pontosabbnak kell lennie a kalibrálandó műszernél. Ahhoz, hogy a tömeg-, illetve időmérés relatív hibáját minimalizáljuk, célszerű a lehető nagyobb Δm és Δt értékekkel dolgozni.

A fenti megfontolásokat figyelembe véve a hibaszámítások megmutatták, hogy az épített kalibráló berendezés relatív hibája 0,15 és 0,3 % között mozog, tehát teljesül az egy nagyságrenddel nagyobb pontosság elve.

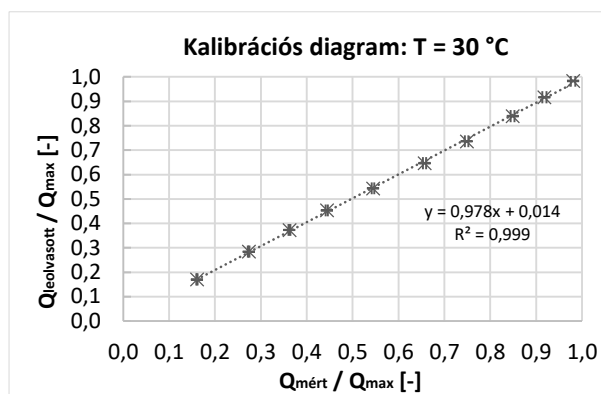


3. ábra: Az összeállított kalibráló berendezés

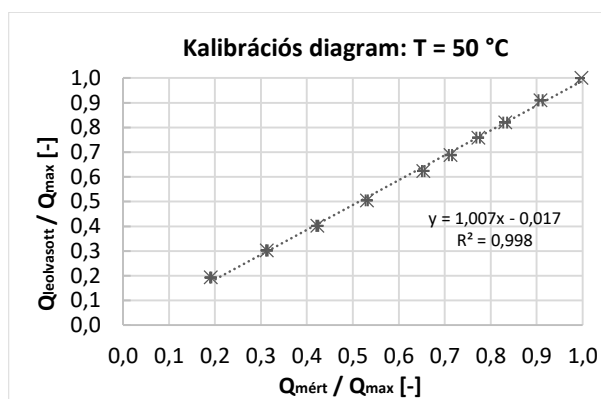
4. A MÉRT ADATOK KIÉRTÉKELÉSE

A méréseket az előbbieken leírtak alapján két, egymástól jelentősen eltérő hőmérsékleten végeztem. Mindkét esetben az üzemi tartomány 10 pontjában mértem, és a kiértékelés során ezekkel az adatokkal dolgoztam.

Az adatsorokat mindegyik esetre dimenziótlánítva közlöm. A dimenziótlánítást a 20 db mérési pont során elért maximális térfogatáram értékkel való leosztással végeztem el. A kalibrációs diagramok 30, illetve 50 °C-on, a hozzájuk tartozó hibásávokkal a 4., illetve az 5. ábrán láthatók.



4. ábra: A kalibrációs diagram 30 °C-on



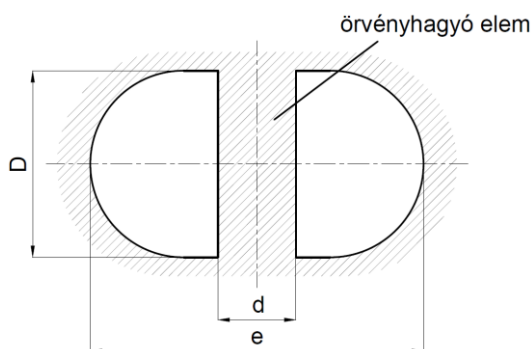
5. ábra: A kalibrációs diagram 50 °C-on

A diagramokon látható, hogy a mérési pontokra illesztett egyenesek közel tökéletes „1” meredekségű egyenesek, tehát a műszer által mért értékek majdnem teljesen megegyeznek a kalibráló berendezéssel mértékekkel.

Megfigyelhető azonban egy trend a pontok egyenestől való eltérésében. Látható, hogy a legkisebb térfogatáramokon még az egyenes fölött helyezkednek el, később lassan átkerülnek a kalibrációs egyenes alá, majd fokozatosan újra fölé tartanak. A továbbiakban ezt a nemlinearitást, „hullámzó” jelenséget vizsgáljuk meg alaposabban.

5. NEMLINEARITÁSI VIZSGÁLATOK

Már említésre került, hogy a nemlinearitás vizsgálata lényegében a Strouhal-szám Reynolds-szám függvényében vett állandóságának vizsgálatát jelenti. Mindkét dimenziótlan jellemző számításához szükség van a közeg sebességére, amelyet a mért térfogatáramból számolhatunk, a sebesség meghatározásához pedig szükség van az áramlási keresztmetszet területére. A keresztmetszet kialakítását a 6. ábra mutatja.



6. ábra: Az áramlási keresztmetszet

A fentiek ismeretében közegsebesség:

$$u = \frac{Q_{\text{mért}}}{D^2\pi/4 + D \cdot (e - D - d)} \quad (4)$$

A mért hőmérsékletre tartozó kinematikai viszkozitás [4], valamint az előbb meghatározott adatok ismeretében már számolható a Reynolds-szám.

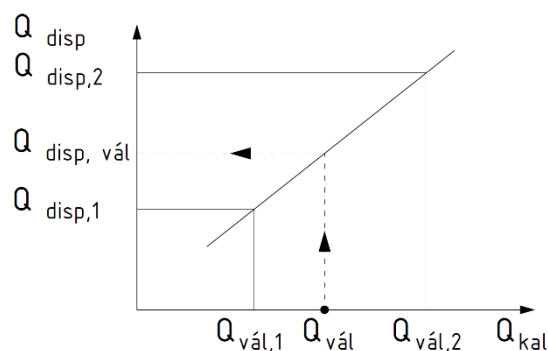
A Strouhal-szám meghatározásához még szükség van az örvényleválási frekvenciára. Bár a műszer ezt közvetlenül méri és kijelzi a belőle számolt térfogatáramot, nincs lehetőség f értékének pontos meghatározására. Mivel jelen esetben nem kifejezetten a Strouhal-szám pontos értéke, hanem inkább annak Reynolds-szám függvényében történő lefutása és arányainak változása a fontos, ezért ezt a probléma áthidalható. Ki kell választani egy jellemző Strouhal-szám – Reynolds-szám értékpárt, és ezekhez a rögzített értékekhez

viszonyítva kell vizsgálni a nemlinearitás jelensége miatt bekövetkező változásokat. A jellemző értékpár kiválasztásához az [5] szakirodalom nyújt segítséget, mely szerint állandó keresztmetszetű körhenger esetén a Strouhal-szám értéke közel állandó: $Str \approx 0,21$. Ez alapján kiválasztottam a $Re_{\text{vál}} = 5000$ és a $Str_{\text{vál}} = 0,21$ értékpárt.

A hőmérséklet – így a kinematikai viszkozitás – ismeretében számítható a megadott Reynolds-számhoz tartozó áramlási sebesség ($u_{\text{vál}}$), a sebesség és a Strouhal-szám ismeretében pedig meghatározható a megadott értékpárra az örvényleválási frekvencia ($f_{\text{vál}}$).

Az előbb kiszámított áramlási sebesség, valamint az ismert keresztmetszet szorzatából számítható a választott pontban a térfogatáram ($Q_{\text{vál}}$). Ezek után meg kell határozni, hogy ez a térfogatáram melyik, kalibráló berendezéssel mért térfogatáram-intervallumba esik, illetve, hogy ezekhez a mért értékekhez milyen, az áramlásmérő által kijelzett (leolvasott) értékek tartoznak.

Ezután lineáris interpoláció alkalmazásával kiszámítandó, hogy ha a választott pontokhoz számolt térfogatáramot a kalibráló berendezéssel mértük volna, akkor ahhoz a trendeket figyelembe véve milyen értéket mutatott volna a műszer. Ez szemléletesen:



7. ábra: A lineáris interpoláció

Ezek után meghatározható egy C konstans:

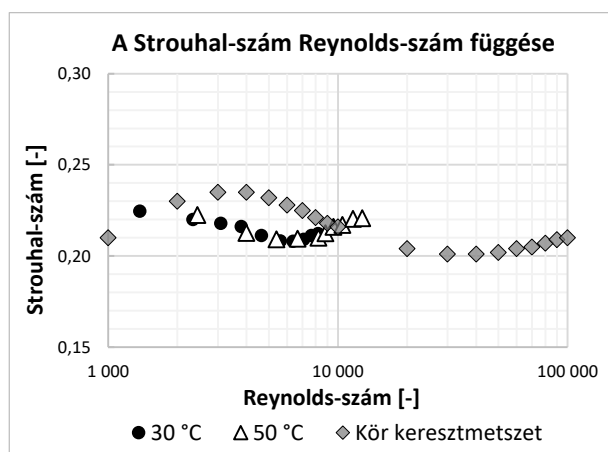
$$C = \frac{Q_{\text{leolv,vál}}}{f_{\text{vál}}} \quad (5)$$

A C tényező ismeretében már minden térfogatáramhoz számolható a hozzá tartozó arányos örvényleválási frekvencia:

$$f_{leolvasott} = \frac{Q_{leolvasott}}{C} \quad (6)$$

A frekvenciákat ismerve minden rendelkezésre áll, hogy az arányos Strouhal-szám meghatározására az összes mérési pontban.

Az nemlinearitások lefutása a két vizsgálati hőmérsékleten a 8. ábrán látható. E diagramban ábrázoltam továbbá – összehasonlítás céljából – a [3] szakirodalom eredményeit is kör keresztmetszetű örvényhagyó elemre.



8. ábra: A Strouhal-szám változása

Az adatsorok vizsgálata alapján az alábbi megállapítások tehetők:

1) Szemrevételezés és lineáris regresszió alapján az ipari elvárásoknak számos esetben megfelelő, igen jó linearitási karakterisztikát mutat a műszer.

2) A Strouhal-szám Reynolds-szám függését vizsgálva jelentősen kisebb Reynolds-szám függés, tapasztalható, mint azt a vonatkozó szakirodalom körhengerre megállapította. Az ingadozásokat befoglaló sáv szélessége a körhengerhez tartozó sáv szélességének megközelítőleg fele.

3) A fenti két pontban foglaltak alapján megállapítható, hogy a Strouhal-szám Reynolds-szám függése inkább a célirányosan vortex mérőkhöz kifejlesztett delta-idomézőhöz hasonlatos. Tehát, köszönhetően a vizsgált mérőműszerhez a gyártó által speciálisan kifejlesztett örvényhagyó elemnek, a műszer karakterisztikája jóval közelebb van a lineárishoz, mint ahogy azt előzetesen – körhenger alakú örvényhagyó elemet feltételezve – vártuk.

4) A $Str(Re)$ függés vizsgálata alapján kijelenthető, hogy az ingadozás a teljes mérési tartományra vetítve a gyártó által vállalt $\pm 3\%$ alatt maradt. Tehát a vizsgált műszer eseti kalibrációjával a [2] katalógus szerinti értéket meghaladó pontosság is elérhető.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatásra került egy vortex áramlásmérő teljes kalibrálási folyamata. Ez magában foglalta egy kalibráló berendezés tervezését és kivitelezését a megadott paraméterek alapján, a kalibrálási mérések elvégzését, majd a mérési adatok feldolgozását és azok kiértékelését. A kiértékelés során a műszer mérési elvéből adódó nemlinearitás hatásait vizsgáltam, azokat összehasonlítottam az ismert szakirodalomban és a gyártói katalógusban szereplő értékekkel. A mérési adatok feldolgozásának eredményeként kijelenthető, hogy a műszer minden vizsgálati pontban teljesítette, illetve több pontra vonatkozóan túlteljesítette az előzetes elvárásokat. Az örvényhagyó elven működő áramlásmérő műszerek viselkedésének részletesebb megértéséhez javasolt numerikus áramlástani vizsgálatokat is végezni. Ezen kívül érdemes lehet több, más mérési tartományra gyártott vortex áramlásmérővel is elvégezni a fent bemutatott vizsgálatokat.

SUMMARY

The whole calibration process of a vortex flow meter was presented in the article. This included the design and building of a calibration setup by the parameters given, carrying out the calibration measurements, and the processing and evaluating of the data acquired. In the evaluation stage, the effects of the non-linearity caused by the measurement principle has been examined. Then comparisons has been made with the values that can be found in the related literature and the manufacturer's catalogue. As the results of the data-processing it can be stated, that the flow meter met the expectations in every investigation points, and it even exceeded them in some cases. For deeper understanding of the behavior of vortex flow meters, application of computational fluid dynamics is recommended. If given the chance, it can be useful to carry out the measurements presented above with vortex flow meters manufactured for other measuring ranges too.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerző kinyilvánítja köszönetét az SMC Hungary Kft. felé a rendelkezésre bocsátott vortex áramlásmérő, és a feladathoz kötődő konzultációs segítség kapcsán. A cikk elkészítése – az örvényzajjal, és így az aeroakusztikával összefüggésben – kapcsolódik az NKFI K 112277 és 119943 projektekhez.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] Balla, E., Vad, J. (2016), Beamforming studies on basic models of low-speed axial fan blade sections. *12th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics (ETC'12)*, Stockholm, Svédország (benyújtva).

[2] SMC Co., *3-color display Digital Flow Switch for Water-Series PF3W; 6-p1039-1065-pf3w*. (2015.10.06) <http://www.smcworld.com>

[3] Durchfluss Fibel. 3. Ausgabe (1990), ISBN3905615037. Endress+Hauser GmbH+Co. <http://www.endress.com>

[4] Microelectronics Heat Transfer Laboratory. (1997), *Fluid Properties Calculator*. (2015.10.06) <http://www.mhlt.uwaterloo.ca/old/onlinetools/airprop/airprop.html>

[5] Dr. Lajos Tamás. (2008), *Az áramlástan alapjai*. Műegyetemi Kiadó, Budapest

[6] Dr. Gruber József és szerzőtársai: *Ventilátorok*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1978.