

Mérési segédlet

H02

Kapulégfüggöny kísérleti vizsgálata

HŐ- ÉS ÁRAMLÁSTAN
BMEGEÁTMG01

Bevezető

A légfüggönyöket két, különböző nyomású vagy hőmérsékletű tér elválasztására használják [1]. Szerepük igen jelentős, mivel a hőveszteség csökkentését teszik lehetővé anélkül, hogy a hozzáférést gátolnák. Ilyen légfüggönyök találhatóak például bevásárlóközpontok bejáratánál, üzemcsarnokok és hűtőházak kapujában is. Ezen felül terek tisztán tartására is használhatóak, megakadályozzák, hogy a szél szennyeződést hordjon be, rovarok repüljenek be a védett térbe, stb.

A mérés célja egy ilyen légfüggöny vizsgálata a H02-es mérőberendezésen. A feladat során a bemenő paraméterek változtatásával különböző állapotú és tulajdonságú légfüggönyöket lehet létrehozni, majd azok viselkedését tanulmányozni mind kvalitatív (áramlás megjelenítése), mind kvantitatív (számítások) szempontból.

A segédlet elolvasása előtt feltétlenül ajánljuk *Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai* című tankönyvből alaposan áttanulmányozni a következő fejezeteket: az impulzustétel [2]; sík szabadsugarak és tulajdonságaik [3]; kapulégfüggönyök és működésük [1]. Ezen kívül érdemes felidézni az alapvető áramlástan mennyiségek mérésére szolgáló eszközöket, működési elvüket, és a hozzájuk kapcsolódó kiértékelő összefüggéseket [4]. Ezek szükségesek a következők megértéséhez.

Fontosabb mennyiségek

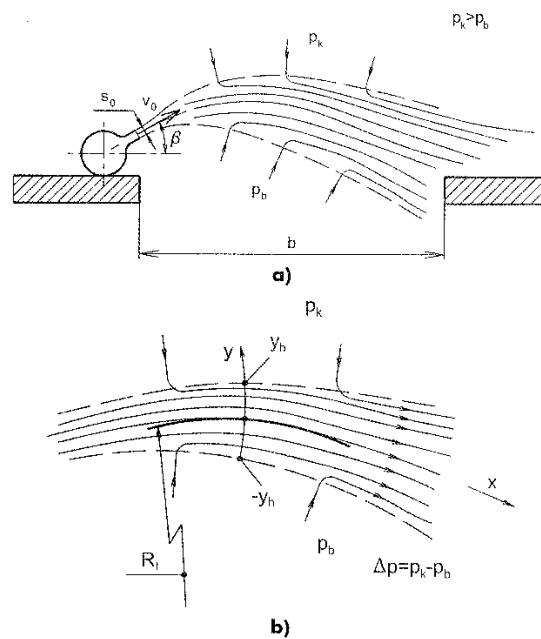
- b lezárt nyílás mérete [m]
- p_k külső nyomás [Pa]
- p_b belső nyomás [Pa]
- Δp külső-belső nyomáskülönbség [Pa]
- Δp_d szabadsugár dinamikus nyomása [Pa]
- ρ levegő sűrűsége [kg/m^3]
- R a szabadsugár görbületi sugara [m]
- R_t a szabadsugár tengelyének görbületi sugara [m]
- s_0 a kifúvó rész mérete [m]
- v_0 a szabadsugár kezdeti sebessége [m/s]
- β kapuszög [$^\circ$]
- B dimenziótlan kapuméret [-]
- D nyomástényező [-]
- K légfüggöny-paraméter mért értéke [-]
- \tilde{K} légfüggöny-paraméter tapasztalati értéke [-]

Elméleti összefoglaló a méréshez és kiértékeléshez

Elmélet

A kapulégfüggöny úgy tart egyensúlyt a belső p_b és a külső p_k nyomás különbségéből eredő Δp nyomáskülönbséggel szemben, hogy az áramvonalak eközben meggörbülnek és így tudják – jó méretezés esetén – lezárni a b szélességű nyílást. Görbült áramvonalak esetén a nyomás változását a normális irányú Euler-egyenlettel tudjuk leírni, mely a térerősség elhanyagolása esetén a következő:

$$\frac{v^2}{R} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (1)$$



1. ábra. Kapulégfüggöny működése (a), áramlási keresztmetszete (b) [1]

A fenti egyenlet fizikailag úgy értelmezhető, hogy a kezdetben egyenes vonalban kibocsátott levegőt egy erőnek kell a görbült pályára kényszerítenie. Ennek az erőnek a forrása pedig a nyomáskülönbség.

Válasszuk szét a fenti differenciálegyenletet és vezessük be az y koordinátát, ami az áramvonalra merőleges, $y = 0$ épp a szabadsugar tengelyénél, míg a szabadsugar szélessége $-y_h$ -től y_h -ig terjed. Integráljuk az egyenletet a szabadsugar két oldala között!

$$\int_{p_b}^{p_k} dp = \int_{-y_h}^{y_h} \rho \frac{v^2}{R} dy \quad (2)$$

Tegyük fel, hogy a légfüggöny görbületi sugara nem változik rá normális irányban, ami a kis széttartás miatt elfogadható közelítés. Így $R = R_t$, azaz a sugár megegyezik a tengelyben mért sugárral, nem függ y -től, tehát kiemelhető az integráljel elé. Az integrálás elvégezve a következőt kapjuk:

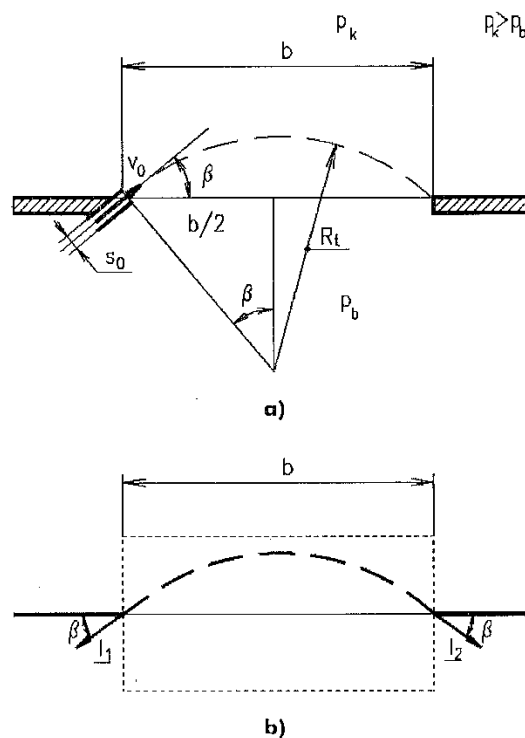
$$\Delta p = p_k - p_b = \frac{1}{R_t} \int_{-y_h}^{y_h} \rho v^2 dy \quad (3)$$

Az egyenlet a sugár teljes hosszában érvényes. Helyettesítsük be a belépési keresztmetszet adatait! Itt a sebesség eloszlása egyenletes, v_0 nagyságú és nem függ y -tól, tehát az integrálás egyszerűen csak a rés szélességével való szorzást jelent.

$$\Delta p = \frac{\rho v_0^2 s_0}{R_t} \quad (4)$$

Ebből az látszik, hogy R_t görbületi sugár az ívhossztól is függetlenül állandó, azaz a szabadsugar által leírt vonal egy körív. Ebből a nyílás szélessége (b) kiszámítható a 2. ábra a) része alapján némi geometria segítségével.

$$b = 2 R_t \sin \beta = 2 \frac{\rho v_0^2 s_0}{\Delta p} \sin \beta \quad (5)$$



2. ábra. A légfüggöny geometriája (a), és az áramlási szögek és távolságok (b) [1]

Írjuk fel az impulzustételt a 2. ábra b) része alapján a jelölt ellenőrző felületre! Az áramlás stacionárius, a térerősséget elhanyagoljuk, így az impulzustétel térfogati integráljai zérus értékűek. A súrlódást szintén elhanyagoljuk. Az impulzusáram-vektorokat a felületből kifelé mutatónan vesszük fel, a nyomásból származó erők pedig befelé mutatnak. Szilárd testre ható erő nincs jelen. Az egyensúly vízszintes komponense triviális, a függőlegesből a következő egyenlet adódik:

$$2 \rho v_0^2 s_0 \sin \beta = \Delta p b \quad (6)$$

Az összefüggést átrendezzük, hogy azonos dimenziójú tagok hányadosaiból álljon:

$$\frac{b}{s_0} = 2 \frac{\rho v_0^2}{\Delta p} \sin \beta \quad (7)$$

Ezután bevezethetjük a dimenziótlan kapuméretet: $B = \frac{b}{s_0}$ és a nyomástényezőt: $D = \frac{\Delta p}{\frac{\rho}{2} v_0^2}$, így a következő elméleti összefüggést kapjuk:

$$B = \frac{4}{D} \sin \beta \quad (8)$$

A valóság azonban el fog térni az ideális modellünktől, ezt pedig úgy vesszük figyelembe, hogy egy K paramétert vezetünk be az egyenletbe az elméletből származó 4 helyett:

$$B = \frac{K}{D} \sin \beta \quad (9)$$

A (9) egyenletből kifejezhetjük K értékét, ami így a mért mennyiségekből számítható lesz.

Korábbi mérések alapján a tényező értékét meg is lehet becsülni. A becsült értéket jelölje \tilde{K} :

$$\tilde{K} = 1,71 + 0,0264 B \quad (10)$$

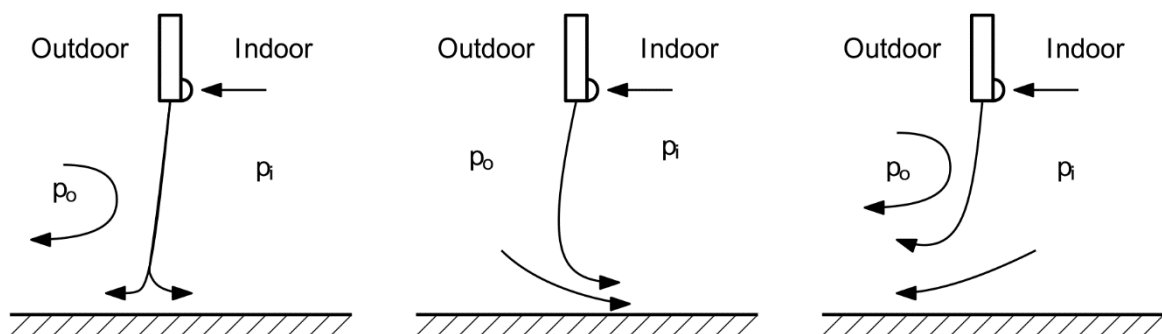
Megjegyzés: a (10) összefüggés $25^\circ < \beta < 45^\circ$ és $10 < B < 40$ feltételek esetén érvényes.

Üzemállapotok

A kapulégfüggöny elvárt működése szerint megkülönböztethetünk rendes és rendellenes üzemiállapotot.

Rendes üzemiállapot során a kapulégfüggönyt alkotó szabadsugar a kapu falához tapad és ebben az állapotban stabilizálódik. A beállított kapuszög meghatározza a szabadsugar alakját, elsősorban görbületi sugarát, miközben kialakul a belső és külső tér közti nyomáskülönbség. Előfordulhat azonban, hogy a sík szabadsugar nem képes a falra feltapadni. Ez nagy befúvási szög esetén fordulhat elő, amikor egyszerűen elfúj ferden a sugar, illetve előfordulhat leváló, csapkodó áramlás is a kapunyílás belépőélénél túl kis befúvási szög esetén, ami jelentős zajjal jár. Ezekben az esetekben a légfüggöny nem képes nyomáskülönbséget fenntartani a két tér között.

Ha záródik a légfüggöny, három különböző üzemiállapotot tapasztalhatunk: nem szivárgó, befelé szivárgó és kifelé szivárgó esetet. Szivárgás alatt itt a kapulégfüggönyön áthaladó eredő térfogatáramot értjük. Rendellenes üzemiállapot esetén egy nem szivárgó légfüggöny esetében lehetséges, hogy a kapu különböző részein befelé- vagy kifelé áramló közeget találunk, de az eredő térfogatáram nulla.



3. ábra. Optimális (balra), befelé szivárgó (középen) és kifelé szivárgó (jobbra) légfüggöny.
Az ábrát Kiss Balázs készítette.

Megfelelő üzemiállapotban a kapulégfüggöny nem szivárgó. Amennyiben a szivárgás térfogatárama kis mértékű a légfüggöny befúvásnál fellépő térfogatáramához képest, úgy feltételezhetjük, hogy a

légfüggöny rendes üzemállapotban van, és a rendes üzemállapotnak megfelelő összefüggések érvényesek maradhatnak.

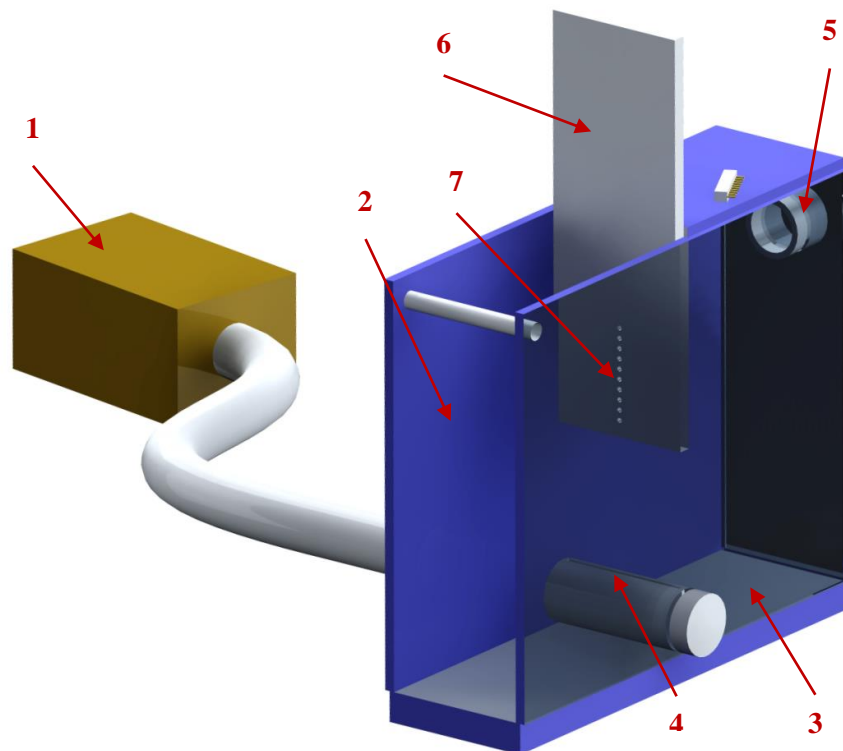
Szintén rendellenes üzemállapot lép fel akkor, ha a szivárgás mértéke számottevő, hiszen ekkor a rendes üzemállapot elméletében tárgyalt impulzusáram-viszonyokhoz képest jelentős eltérés tapasztalható. Erős befelé szivárgáskor a szabadsugár a belső tér felé görbül, és az elszívócsonkon keresztül távozik, a nyomásviszonyok bonyolultak. Erős kifelé szivárgáskor a szabadsugár nem görbül meg, mivel a szívócsonkon keresztül a külső és belső tér nyomáskülönbsége ki tud egyenlítődni, ekkor a nyomásviszonyok mellett elsősorban a térfogatáram-viszonyok az érdekesek.

Mérőberendezés

A mérőberendezés elemei a következők:

- fűvó
- szabályozó tekercs
- mérőberendezés, benne
 - állítható szögű befűvó elem
 - állítható nyílású kapu
 - lezárható beszívó mérőperem
 - fali nyomáskivezetés a védett térben
 - fali nyomáskivezetés a kapu falán
- Pitot-cső
- digitális nyomásmérő
- füstgenerátor
- lézersík

A mérés során a tekercs állításával különböző térfogatáramokat lehet beállítani. A levegő a fűvóból a résen keresztül lép be a mérőberendezésbe, majd kialakul a sík szabadsugár, ami megfelelő beállítások esetén lezárja a kaput. A mérőperem lezárásával nem szivárgó, megnyitásával kifelé szivárgó állapot hozható létre. Szivárgó állapot esetén a mérőperem nyomáseséséből számítható a szivárgó térfogatáram. A nyomásmegcsapolásokon mérhető a védett tér légkörhöz viszonyított nyomáskülönbsége, a nyomáskivezetéseken keresztül pedig a kapu feletti nyomás eloszlása is mérhető.



4. ábra. A mérőberendezés sematikus vázlata. 1 – fűvó, 2 – külső tér, 3 – védett tér, 4 – befűvó elem, 5 – lezárható beszívó mérőperem, 6 – állítható nyílású kapu, 7 – fali nyomáskivezetések a kapu falán.
Az ábrát készítette: Bogár Judit

Mérési feladatok

Általános feladatok

A feladattól függően létre kell hozni egy szivárgó vagy egy nem szivárgó légfüggönyt.

Minden feladat esetén le kell mérni a p_k környezeti nyomást, a T_k környezeti hőmérsékletet, illetve a szükséges geometriai méreteket. Az első kettőt a mérés kezdetén és végén is le kell mérni, majd a mért értékek átlagából számítható a levegő sűrűsége.

Ezután feladattól függően el különböző beállításokkal fel kell térképezni egy-egy paramétertartományt, közben mérni a következő mennyiségeket:

- a légfüggönyt alkotó szabadsugár Δp_d dinamikus nyomása
- b kapuszélesség
- β kapuszög
- Δp nyomáskülönbség a kültér és beltér között

A szabadsugár Δp_d dinamikus nyomását a rés mentén 4-5 pontban kell lemérni, majd átlagolni, hogy az esetleges egyenetlenségek hatását csökkentsük.

A különböző feladatok során esetenként a kapunyílás felett található 10 mérőpont nyomását is le kell mérni, amelyből a légfüggöny záródására következtethetünk. Amennyiben ugyanis ott záródik a légfüggöny, egy vagy néhány pontban kiugróan nagy nyomásra számítunk a beérkező levegő dinamikus nyomása miatt. Ha nincs ilyen pont, két lehetőség egyike állhat fenn:

- a) a légfüggöny nem képes bezáródni, mely esetben a külső és a belső tér közötti nyomáskülönbség elhanyagolható, vagy
- b) a légfüggöny záródik, de a mérési pontok felett, mely esetben a nyomáskülönbség jelentős.

A mért 10 fali nyomás és a külső-belső nyomáskülönbség alapján határozza meg, melyik eset áll fenn! Indokolja áramlástan szemszögből a nyomáseloszlás alakját! Lehetséges okok: leválás az éles perem után, fallal párhuzamos áramlás, szabadsugár visszafekvése, stb.

Ha a fúvó fordulatszámát is változtatjuk, a belépő dinamikus nyomást minden beállításnál újra le kell mérni.

A mérés végén a használt nyomásmérő berendezéseket kalibrálni kell.

A feladatok befejeztével lehetőség nyílik a légfüggöny működésének kvalitatív vizsgálatára. A fúvó szívócsonkján keresztül bebocsátott füst és lézersík segítségével megjeleníthető az áramlás. A látottakat vesse össze a kapulégfüggöny feltételezett működési viszonyaival. Erről készítsen szöveges értékelést, vázlatrajzot. Lehetőség szerint fényképezze le a vizualizált áramlást.

A feladat: nem szivárgó kapulégfüggöny

A belső tér szívócsonkjának lezárásával és az esetleges rések szigetelésével hozzon létre nem szivárgó légfüggönnyt!

Négy kapuszélesség esetén 5-10 kapuszög beállításával hozzon létre különböző üzemiállapotokat, és mérje meg a bel- és kültér közti nyomáskülönbséget, valamint a szélső esetekben a kapu feletti fali nyomáseloszlást is! A fordulatszámot tartsa állandó értéken! Értékelje ki a mérési eredményeket: hasonlítsa össze az irodalomból származó K és a tapasztalati képlet által adott \tilde{K} értékeit!

B feladat: nem szivárgó kapulégfüggöny

A belső tér szívócsonkjának lezárásával és az esetleges rések szigetelésével hozzon létre nem szivárgó légfüggönnyt!

Két különböző kapuszélesség mellett változtassa a kapuszöget 5-10 pontban, majd ugyanezeket a pontokat állítsa be egy másik befúvott térfogatáram érték mellett is. Minden egyes állásnál mérje belső tér és a légkör nyomáskülönbségét! A szélső helyzetekben mérje meg a fali nyomáseloszlásokat is! Hasonlítsa össze a két szabadsugár sebesség esetén a \tilde{K} tapasztalati értékeit!

C feladat: szivárgó kapulégfüggöny

A belső tér szívócsonkját nyissa ki, így hozzon létre szivárgó légfüggönnyt!

Négy választott kapuszélesség mellett a 3-3 befúvási szög változtatásával állítson be különböző üzemiállapotokat, és mérje meg a bel- és kültér közti nyomáskülönbséget, valamint a szívócsonkhoz illesztett beszívó mérőtölcséren mérhető Δp_{mp} nyomáskülönbséget, melyből a szivárgó q_{sz} térfogatáram kiszámítható. A szélső esetekben mérje meg a kapunyílás feletti nyomáseloszlást is! Végezze el a mérést azonos beállítások mellett egy nem szivárgó légfüggönyön is! Hasonlítsa össze az eredményeket!

Kiértékelés

Mutassa be a közvetlenül mért és az ebből számított adatokat táblázatos formában. Ábrázolja a nyomáskülönbséget a külső és a belső tér között a releváns paraméterek függvényében, továbbá szivárgó légfüggöny esetén az elszívott térfogatáramok arányát is. Nem szivárgó légfüggönnyel feltételezve számítsa ki az irodalom által megadott képletek segítségével a beállított bemeneti paraméterekből a névleges üzemállapot esetén adódó nyomáskülönbséget, és vesse össze a mérések eredményével.

Végezze el a mért adatok dimenziótlanítását: számítsa ki a beállított dimenziótlan B és $\sin \beta$ bemeneti paramétereket, valamint a mért nyomáskülönbségekből a dimenziótlan D nyomáskülönbséget. Ha volt szivárgás, számítsa ki a q_{sz} szivárgó térfogatáramot a mérőperem nyomáseséséből, majd a dimenziótlan $Q = q_{sz}/q_{be}$ paramétert, végül ábrázolja D és Q kapcsolatát!

Számítsa ki a mért adatokból számítható K tényezőt, és ábrázolja ezt B függvényében az irodalomból adott \tilde{K} értékével együtt. Hasonlítsa össze ezeket!

Értékelje a kapott rendszer viselkedését! Van-e kvalitatív vagy akár kvantitatív egyezés az irodalom által jóslt eredmények és a mért eredmények között? Mely paramétertartományban jó az egyezés? Van-e olyan paramétertartomány, ahol a rendszer viselkedése lényegesen eltér az irodalom által jóslttól? Hogyan jellemezhetjük itt a rendszer viselkedését? Milyen összefüggést lehet teremteni ekkor a kimeneti és bemeneti paraméterek között? Mi lehet az eltérés oka? Milyen áramlástan jelenségek befolyásolják a rendszer működését?

A kalibráció segítségével minősítse a nyomásmérő pontosságát. Ha az nem megfelelő, korrigálja az adatokat a kalibráció egyenletének segítségével.

Mérési bizonytalanság becslése

A jegyzőkönyvben a K tényezőt hibasávval együtt kell ábrázolni. A bizonytalanság becsléséhez („hibaszámítás”) a digitális nyomásmérővel történő mérés bizonytalansága 2 [Pa]-nak vehető [5]. A többi mért érték bizonytalanságát a használt mérőeszköz pontosságának megfelelően kell megválasztani.

Források

Kapulégfüggönyök és működésük [1], az impulzustétel [2], sík szabadsugarak és tulajdonságaik [3]. Ezen kívül érdemes felidézni az alapvető áramlástan mennyiségek mérésére szolgáló eszközöket, működési elvüket, és a hozzájuk kapcsolódó kiértékelő képleteket [4].

- [1] Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai, Budapest, 2008. 7.6 fejezet
- [2] Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai, Budapest, 2008. 7.1.1 fejezet
- [3] Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai, Budapest, 2008. 7.5.2 fejezet
- [4] Lajos Tamás: Az áramlástan alapjai, Budapest, 2008. 6.2.5, 6.3.1, 6.3.3, 6.3.4, 6.3.5 fejezetek
- [5] EMB-001 kézi digitális nyomásmérő berendezés
http://www.ara.bme.hu/oktatas/tantargy/NEPTUN/BMEGEATAG11/MAGYAR_kepzes/2015-2016-II/lab/Digitalis_manometer_EMB-001_Manual.pdf