

FORGÓ GÉPEK HÚTÉSÉNEK ELMÉLETI ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

KONECSNY Ferenc

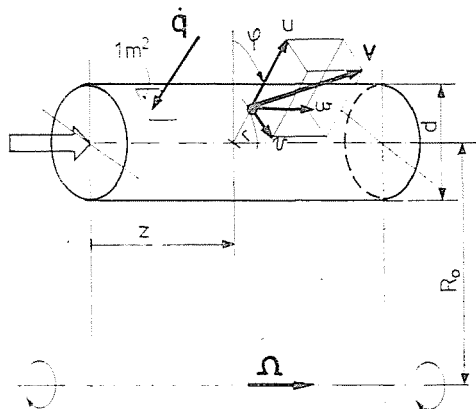
Budapesti Műszaki Egyetem, Közlekedésmérnöki Kar
Járműgépészeti Intézet

Összefoglalás

A fűtött forgó csatornák áramképe a centrifugális és a Coriolis-erők keltette szekunderáramlás, a csatorna szívott és nyomott oldala közelében jelentkező stabilizáció ill. destabilizáció, valamint a belépő perdület együttes hatására aszimmetrikus térbeli struktúrát kap. A matematikai nehézségek miatt a hőmérsékletmező és a hőátadás kísérleti adatok segítségével határozható meg. A mérések során négy paramétert kell szisztematikusan változtatni.

A forgó gépek — villamos motorok, gázturbinák — térfogategységére eső teljesítmény növelése az üzemi hőmérséklet emelkedését vonja maga után. Az üzembiztonság viszont megkívánja, hogy a hőmérsékletcsúcsok ne haladják meg az anyag mechanikai és villamos szilárdságához mérten megengedhető értéket. A két szempontot összeegyeztető gazdaságos konstrukció csak a lokális hőmérsékletmegoszlás pontos ismeretében hozható létre.

Az 1. ábra a forgó gépek hűtési rendszerének jellegzetes elemét, a tengelyvel párhuzamos, s körül R_0 sugáron Ω szögsebességgel keringő hosszanti csatornát mutatja. A hűtőhatást az ezen átáramló légnemű, vagy cseppfolyós közeg fejt ki, amely a csatorna meleg falánál a felületegységre és az időegységre vonatkoztatva \dot{q} (W/m^2) hőt vesz föl és ennek hatására a csatorna valamely $(r; \varphi; z)$ koordinátájú pontjában az adott kezdeti hőmérsékletről $T(K)$ hőmér-



1. ábra

sékletre melegszik. A gépek hűtési rendszerének méretezéséhez azért szükséges a $T = T(r; \varphi; z)$ hőfokmező pontos ismerete, mert adott elvezetendő hő — vagyis adott \dot{q} hőfluxus — esetén ennek a csatornafalon fölött $T(d/2; \varphi; z)$ értéke szabja meg a szerkezeti részek lokális hőmérsékletét.

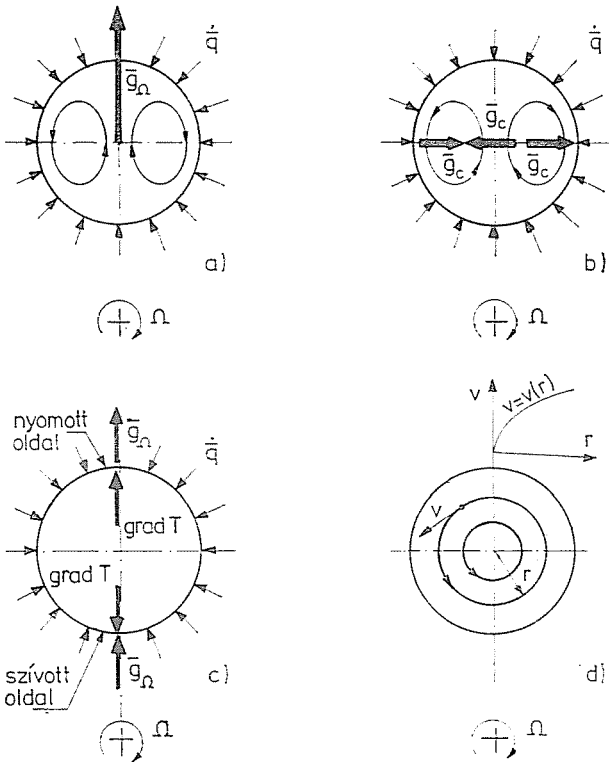
Ha adott lenne a csatornában a relatív mozgás $v = v(r; \varphi; z)$ sebességmezeje (vagyis ha ismernénk az u, v, w sebességkomponensek értékét a hely függvényében), akkor a hőmérsékletmezőt könnyen meghatározhatnánk az áramlás entalpiamérlegéből. A forgás hatására azonban az áramlásban olyan — önmagukban is hőmérsékletfüggő — mechanikai változások jelennek meg az álló csatornabeli jól ismert izotermikus áramképhez képest, amelyek következtében a két mező kölcsönösen befolyásolja egymást és meghatározásukhoz a folytonossági egyenletről, a mozgásegyenletről és az entalpiamérlegből álló másodrendű, nem lineáris differenciál-egyenletrendszerrel kell adott peremfeltételek mellett megoldani, ami rendkívül nehéz feladat.

A következőkben szeretnék rámutatni néhány tényezőre, amely által a forgás módosíthatja az álló csatornában létrejövő áramlásmechanikai folyamatot. Ezek közül három a forgó rendszerben ébredő — s a gravitációs erőt több nagyságrenddel fölülmúló — járulékos erőkkel kapcsolatos, míg a negyedik a keringő mozgást végző csatornába lépő áramlás előéletét juttatja kifejezésre.

A centrifugális erő hatása

Ha a csatornát nem fűtjük, akkor a benne létrejövő áramlás izotermikus és az áramló közeg sűrűsége gyakorlatilag konstans. Ilyen esetben a forgó rendszerben ébredő centrifugális erők* hatására megváltozik ugyan a csatorna keresztmetszet síkjában a nyomásmegoszlás, ez azonban nem befolyásolja az áramképet, mert a radiálisan kifelé irányuló centrifugális erőt a keresztmetszet minden pontjában kiegyensúlyozza a nyomásból származó s radiálisan befelé irányuló erő. Ellenben ha a csatorna falán át hőbevezetés történik, akkor a keresztmetszetben egyenetlenné válik a hőmérséklet és így a sűrűség megoszlása is: a csatorna középvonala közelében a hidegebb sűrű, a csatornafal közelében a melegebb ritka közeg halad át a csatornán. A centrifugális erőtér, párosulva az inhomogén sűrűségmegoszlással, már képes az átáramlásra merőleges keresztmetszeti síkban létrehozni a szekunderáramlást. A relatíve sűrűbb középponti mag a forgástengelytől távolodni fog, a falközeli meleg rétegek pedig — a folytonosságot biztosítandó — a forgástengely felé mozdulnak el. A szekundermozgás a kiváltó ok szimmetriája miatt szimmetrikus lesz a forgástengelyen átmenő átmérősíkra és kvalitatív áramképét a 2. ábra (a) képén tüntettük föl.

* A tömegegységre ható centrifugális erőt g_0 -val jelöljük.



2. ábra

A Coriolis-erők szerepe

A forgó rendszerben értelmezett második járulékos erő — a Coriolis-erő — a csatornában áramló közeg minden olyan tömegelemére hatást fejt ki, amelynek relatív sebessége nem párhuzamos a forgástengellyel.* A hatás irányát a v relatív sebességnek és a rendszer Ω szögsebességének $v \times \Omega$ vektori szorzata jelöli ki. Így a centrifugális fölhajtóerő keltette szekunderáramlásnak a 2. ábra (a) képén föltüntetett áramvonalait tekintve belátható, hogy a csatornakeresztmetszetnek a forgástengely és a csatorna középvonala által meghatározott átmérősík közelében levő középső részein a forgásiránnyal ellentett, a falak közelében levő részein pedig azzal megegyező értelemben ébredő Coriolis-erők működnek (2. ábra (b) jelű képe). Ennek hatására a meglévő szekunderáramlás szimmetriája megbomlik és eredőként bonyolult áramkép jön létre a keresztmetszet síkjában. A mozgásegyenlet elemzésével kimutatható (lásd pl. [1], [2], [3]), hogy — ellentétben a centrifugális erőtérral — a Coriolis-erők izotermikus

* A tömegegységre ható Coriolis-erőt g_c -vel jelöljük.

áramlás esetén is képesek fönntartani szekunderáramlást a keresztmetszetszeli nyomásmegoszlásra gyakorolt módosító hatásuk révén. Ez azonban a csatorna kezdeti szakaszára korlátozódik, ahol az axiális sebesség megoszlása még keresztmetszetről keresztmetszetre változik.

Stabilizáló és destabilizáló hatások

A 2. ábra (c) képén föltüntettük a fűtött csatorna keresztmetszetének két jellegzetes tartományában a centrifugális erőtér térerősségének és a hőmérséklet gradiensének a vektorait. A forgástengelytől távolabbi alkotó közelében (nevezzük ezt a tartományt a rövidség kedvéért *nyomott oldalnak*, kifejezve azt a tényt, hogy a centrifugális erőtér hatására itt nagyobb a hidrosztatikai nyomás, mint a csatorna középvonalában) e vektorok megegyező értelműek, vagy legalábbis hegyesszöget fognak közre, míg a forgástengelyhez közelebbi alkotó környékén (a *szívott oldalon*) ellentétes értelműek, vagy tompaszöget zárnak be. Ez a körülmény lényeges eltérést okoz a szívott és a nyomott oldali áramlásszerkezet alakulásában. Képzeljük el, hogy a keresztmetszet síkjába eső turbulens sebességingadozások falra merőleges komponensei révén a falközeli tartományból egy kisebb sűrűségű tömegelem igyekszik az áramlás hidegebb, tehát sűrűbb magja felé. A nyomott oldalon a tömegelemnek ez a vándorlása a centrifugális erőtérrel ellentétes, a szívott oldalon pedig azzal megegyező értelemben történik. Az új környezetéhez képest könnyebb tömegelem elmozdulása közben a centrifugális erőtér és a sűrűségbeli inhomogenitás kölcsönhatásaként létrejövő lokális fölhajtóerő a nyomott oldalnál munkát végez a tömegelemen, növelve ezáltal a turbulens mozgás kinetikai energiáját. (A jelenség analogonja a környezetüknél melegebb légtömegek gyorsuló föláramlása a Föld gravitációs erőterében.) A szívott oldal közelében ezzel szemben az elmozduló tömegelemnek kell munkát végeznie a fölhajtóerő ellenében, így mozgása csak a turbulens kinetikai energia apadása árán tartható fönn. Ugyanilyen következtetést vonhatunk le a nyomott és a szívott oldal közelében lejátszódó lokális folyamatokra nézve akkor is, ha a turbulens mozgás következtében az áramlás magjából a falközeli melegebb környezetbe jutó relatíve hidegebb tömegelem sorsát vizsgáljuk. Ezek szerint a fűtött csatornáknak a forgás a szívott oldal közelében stabilizáló, a nyomott oldal közelében destabilizáló hatást fejt ki; a nyomott oldalon intenzívebbé teszi a turbulens mellékmozgásokat, a szívott oldalon elnyomja azokat.

A belépő perdület

A forgó csatornában kialakuló áramkép a csatorna kezdeti szakaszán nagy mértékben függ a belépő keresztmetszethez érkező áramlás sebességmegoszlásától, amit viszont a csatornát megelőző járatok és az azokba épített objektumok geometriája határoz meg a maga sokrétű változatosságával. Az áramlás előéletének ez a sokfélesége témánk szempontjából a belépő perdület alapján rendszerezhető. Belépő perdületen a 2. ábra (d) jelű képen föltüntetett belépő keresztmetszetszeli áramvonalssereg egyedeire jellemző tangenciális sebességkomponens hely szerinti megoszlásának $v = v(r)$ törvényét értjük. Speciális esetként az előperdület jelentheti a csatornához viszonyított merev test-szerű relatív forgást, vagy akár a perdületmentes belépést is. (Az elsónél a $v(r)$ lineáris függvény, az utóbbinál azonosan eltűnik.) Szerepe abban áll, hogy a csatorna kezdeti szakaszában szuperponálódik a fölhajtóerő keltette szekunderáramlásra és ezáltal résztvesz a lokális hőátadási folyamat alakításában.

A csatorna forgásával kapcsolatos jellegzetes tényezők kvalitatív áttekintésének célja az volt, hogy ráirányítsa figyelmünket a konstruktőrnek és a kísérletezőnek egyaránt fontos tényre: *forgó csatornában az álló csatorna hőátadási folyamatának vizsgálatánál megszokott axiális szimmetria megszűnik és a csatorna kerülete mentén bonyolultan változó, lokális szélső értékekkel rendelkező hőfokmegoszlásra kell számítani.*

A jelenség elméleti vizsgálatával járó említett nehézségek miatt a kísérletezőnek a feladata az, hogy megbízható kvantitatív információkat bocsásson a konstruktőr rendelkezésére. Ő maga ezekhez szisztematikus mérések útján juthat hozzá. A differenciálegyenlet-rendszer elemzése azt mutatta, hogy adott hozzááramlási feltételek mellett a mérések során egymástól függetlenül változtatandó paraméterek minimális száma négy: a közeg tömegárama; a fordulatszám; a hőfluxus és az R_0/d excentricitás. Az elvégzendő méréseknek föl kell ölelniük e paraméterek géptervezési gyakorlatban szóba jöhető teljes tartományát.

Irodalom

1. Barua, S. N.: Proc. Roy. Soc. London 227A (1955).
2. Mori, Y.—Nakayama, W.: Int. J. Heat Mass Transfer 11, 1027 (1968).
3. Mori, Y.—Nakayama, W.: Int. J. Heat Mass Transfer 14, 1040 (1971).

Dr. Konecsny Ferenc egy. docens