

KÖRNYEZETI ÁRAMLÁSOK SZEMELVÉNYEK A KÁRMÁN LABORATÓRIUM KÍSÉRLETEIBŐL*

1. rész: Szabadfelszíni hullámjelenségek és áramló közegek rétegzettségével kapcsolatos jelenségek

Érdekes és látványos bemutatót szervezett 2004. decemberében az MTA Meteorológiai Tudományos Bizottság Légekördinamikai Munkabizottsága. Először a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Kármán Tódor Szélcsatorna Laboratóriumának munkáját ismerhették meg a meghívottak, majd az ELTE Környezeti Áramlások Kármán Laboratóriumát mutatták be a laboratórium munkatársai. A külföldi példák, elsősorban a Cambridge-i Egyetem Geofizikai Folyadékdinamikai Laboratóriumának mintájára létrehozott, oktatással és kutatással egyaránt foglalkozó tudományos műhelyben több olyan demonstrációs kísérlet is megtekinthető, amely valamilyen ismert légköri jelenség analógiáját szolgáltatja. Az elsősorban fizikusokból álló, de meteorológus doktoranduszt is foglalkoztató Kármán Labor munkatársai az elmúlt hónapokban elkészítették Szerkesztőségünk számára a kísérletek leírását, amelyet most Olvasóinkkal is szeretnénk megismertetni. (A szerk.)

Szabadfelszíni hullámjelenségek

Szoliton, cunami

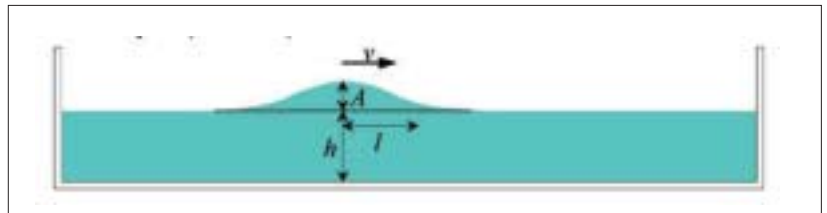
A szoliton sekély vízben előforduló, nagy amplitúdójú, diszperzív, nemlineáris hullám. Egyetlen hullámhegyből álló, rendkívül nagy stabilitású, változatlan formában, sokáig megmaradó alakzat. Laboratóriumi körülmények között is egyszerűen megvalósítható.

A kísérlet egy átlátszó anyagból készült, hosszú kádban végezhető

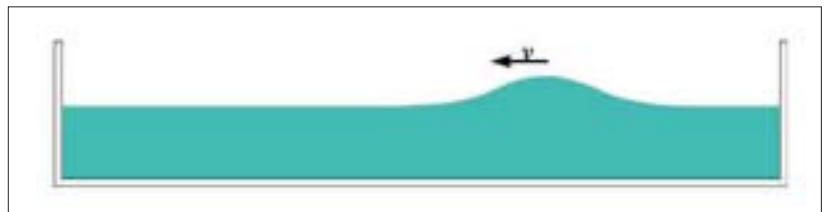
el, amelynek szélességét és magasságát néhány deciméternek, hosszúságát néhány méternek célszerű választani. A kád egyik végében egy eltávolítható lap segítségével néhány deciméter hosszúságú rekeszt hozunk létre. A kádat „lépcsősen” töltjük fel, úgy, hogy a rekeszben lévő víz határozottan magasabban álljon, mint a hosszú részbe töltött víz (1. ábra).



1. ábra: „Lépcsősen” feltöltött kád



2. ábra: A válaszfal eltávolításával elindítunk egy szolitont



3. ábra: A szoliton (többszöri) ütközés után is megtartja alakját, és változatlan sebességgel halad tovább

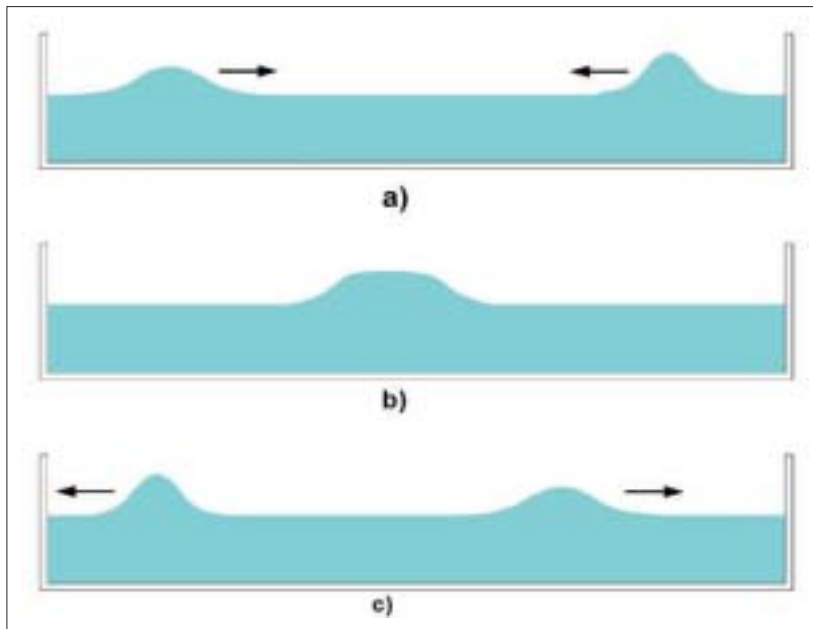
Amikor a feltöltéssel járó zavaró mozgások lecsillapodnak, kihúzzuk a válaszfalat, és ezzel egy mozgó vízküretet indítunk el: egy szolitont hozunk létre (2. ábra). A válaszfal kihúzásakor nemcsak szoliton keletkezik, hanem más, kis amplitúdó-

jú víz hullámok is. A szoliton nemcsak nagy méretű, hanem sokáig is él, alakját megtartva, egyenes sebességgel mozog, jól ellenállva a sűrűlódásnak is. Így ha eleget várunk, a kisebb felszíni hullámok zavaró hatása elenyészik, és a kádban csak a szoliton marad fenn. Hosszú élettartamát, alakjának stabilitását, valamint egyenes sebességét mi sem mutatja jobban, mint az a tény, hogy

többszöri oda-vissza vonulása során a kád két végének rendszeresen nekiütközve és onnan visszapattanva is gyakorlatilag változatlanul halad tovább útján (3. ábra).

Ha nem egy, hanem egymást követően két szolitont keltünk, akkor

* A Környezetfizikai laboratóriumi gyakorlatok (szerkesztette Kiss Ádám), ELTE Eötvös Kiadó, 2005 című tankönyv képanyaga alapján.



4. ábra: a) Két szoliton éppen találkozni készül, de még túlságosan távol vannak egymástól ahhoz, hogy érezzék egymás közelségét. b) Miközben áthaladnak egymáson, együttes alakjuk szemmel láthatóan megváltozik. (Ebből arra következtethetünk, hogy az egybeolvadt alakzat a két szoliton nemlineáris szuperpozíciója.) c) A szétválás után ismét az eredeti (találkozás előtti) alakjukban jelennek meg, változatlan sebességgel

megfigyelhetjük, hogyan hatnak egymásra. A két szolitonot indíthatjuk közel egyidejűleg a kád két végéből (azaz egymás felé), vagy a kádnak ugyanabból a végéből, némi időkülönbséggel. Ez utóbbi esetben is (a kádfallal való ütközéseknek köszönhetően) hamar előáll egy olyan helyzet, amikor egymás felé tartanak, találkoznak (eközben furcsán összeolvadnak), majd elválnak, és tovább folytatják útjukat *eredeti* alakjukban, változatlan sebességgel, mintha mi sem történt volna. Mind ezt vázlatosan szemlélteti a 4. ábra.

Levonhatjuk hát a következtetést, hogy a szoliton nemcsak az idő és a súrlódás romboló hatásával szemben tanúsít nagy ellenállást, hanem egy (vagy több) másik szolitonnal való ütközéssel szemben is. (Ez utóbbi „részcsekszerű” tulajdonsága miatt kapta az elnevezésében szereplő „-on” végződést.)

Egy vagy néhány ilyen erős, stabil óriáshullám a természetben hatalmas pusztítást képes véghezvinni. Példa erre az óceáni földrengéseket vagy az azoknál jóval ritkábban be-

következő óceáni meteor-bechapódásokat kísérő hullám, a japán néven közismert *cunami*, amelynek sebessége több száz km/h is lehet, a partközeli vizekben megnöve magassága elérheti a több métert, és hatalmas pusztítást okozhat. A 2004. december 26-i Csendes-óceáni földrengés által keltett cunami a nyílt óceánon alig 1 m magas (de több száz km széles) vízszint-emelkedést jelentett. Sebessége az elmélet szerint közelítőleg egyenlő a nehézségi

óra alatt ért el Szumátrától Sri Lankáig, és fél nap alatt az afrikai partokig. A hullámfront szélessége a vízmélység köbének négyzetgyökével egyenesen, az amplitúdó négyzetgyökével fordítottan arányos. Az így számítható 250 km-es érték szintén összhangban van a megfigyelésekkel. Az ilyen hatalmas cunamik szerencsére nagyon ritkák. Kisebb cunamikat azonban gyakran megfigyelnek: ezeket apróbb földrengések, földcsuszamlások vagy a sarki gleccserekről a tengerbe szakadó jégtablák keltik.

Áramló közegek rétegzettségével kapcsolatos jelenségek

Áramlási front mozgása

A második kísérletben két, különböző sűrűségű közeg egymásra rétegződését vizsgáljuk. Ennek lényege, hogy egy sűrűbb közeg addig áramlik egy kevésbé sűrű alá (vagy a hígabb réteg a sűrűbb fölé), amíg az egyensúly be nem áll. Célunknak megfelel az előző kísérlethez használt, vagy ahhoz hasonló, hosszú, kis rekeszrel ellátott kád. A rekeszt most ugyanaddig a magasságig töltjük fel mint a kád hosszú részét, de a kis rekeszbe alkalmasan színezett (pl. sötétkék) folyadék kerül, amely egyúttal sűrűbb (például hidegebb vagy sós víz) a másik részbe töltött „tisza” víznél (5. ábra).



5. ábra: Átlátszó kísérleti kád kiemelhető válaszfalal, bal rekeszébe sűrűbb folyadékot töltünk

gyorsulás és a vízmélység szorzatának négyzetgyökével. Ez a mintegy 4 km mély tengerben több mint 700 km/óra. A 2004-es cunami a fenti számítással megegyezően valóban 2

A válaszfalat eltávolítva azt látjuk, hogy a két közeg nem szívesen keveredik egymással, hanem a festett víz meglehetősen jól definiált határt tartva „bekúszik” a festetlen



6. ábra: a) Az induló front alakja, közvetlenül a válaszfal eltávolítása után. b) Léggöri hidegfront alakja

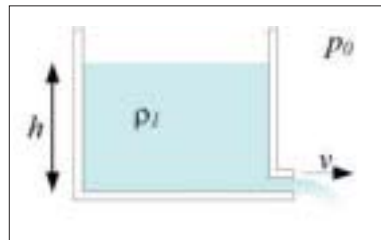
alá, és fordítva. E front kezdeti alakját szemlélteti a 6. ábra.

A kezdeti pillanatok után a sötét nyúlvány egyre távolabbra kúszik a fenéken. A két különböző sűrűségű közeg mozgását a gravitáció irányítja: súlypontjuk a kezdeti egymással azonos magasságban lévő nem-egyensúlyi helyzetükből az egymás alatti stabil egyensúly felé törekednek. Az ilyen áramlatokat *gravitációs áramlatoknak* nevezük, és a természetben számos példa található rájuk: ilyen a lavina vagy a lávafolyam (ezek esetében maga a levegő képviseli a ritkább közeget), a léggöri hideg- vagy melegfrontok betörése. A jelenséget nem forgatott közegben vizsgáljuk, ezért frontjaink a léggöri frontok kis léptékű viselkedését modellezzik, ahol a Coriolis-erő hatása elhanyagolható.

Felülnézetből látszik, hogy a kád teljes szélességében előrenyomuló folyadék frontvonala nem egyenes, hanem – mintegy önmagát előzgetve – kissé oszcillál. A front azonban sokkal stabilabb annál, mintsem szétessen, és oldalnézetből továbbra is jól követhető a terjedése. Elemi módszerekkel megmérve a sebességét, újabb érdekes dologról szerzünk tudomást: a front jó közelítéssel egyenletes ütemben halad végig a kádon.

Elméletileg a front haladási sebessége $v \approx (2g'h)^{1/2}$, ahol h az elhaladó front mögött kialakuló sű-

rűbb alsó réteg magassága, g' pedig a két folyadék közötti csekély sűrűségkülönbséggel $(\rho_1 - \rho_2)$ arányos *redukált nehézségi gyorsulás* ($g' = g(\rho_1 - \rho_2)/\rho_1$). A haladási sebességet megadó egyenlet alakja ismerős a Torricelli-féle kiömlési törvényből: * hasonlóan függ a redukált nehézségi gyorsulástól, mint ahogy a h magasságú folyadékkal feltöltött edény aljából való kifolyás (7. ábra) sebessége a teljes g -től.



7. ábra: Edény alján lévő szűk nyíláson kiömlő folyadék

A redukált nehézségi gyorsulás egy nagyobb (ρ_1) sűrűségű alsó és egy kisebb (ρ_2) sűrűségű közeg határfelületén kialakuló mozgásoknál játszik fontos szerepet. Mivel a két közeg sűrűsége általában csak kevéssé tér el egymástól, ezért a nevezőben fellépő ρ_1 helyett a két réteg ρ_0 átlagos sűrűségét is használhatjuk.

Gyakori eset, hogy a sűrűségkülönbséget kizárólag az adott közeg változó hőmérséklete hozza létre, a két réteg anyagi minősége egyébként azonos. A hőtágulás ismert törvénye szerint, a térfogatváltozás $\Delta V = \alpha V \Delta T$, ahol α a térfogati hőtágulási együttható, ΔT pedig a hőmérsékletkülönbség. Adott tömeg és kis eltérés esetén ebből következik, hogy a sűrűségek közötti különbség $\rho_1 - \rho_2 = \rho_0 \alpha V \Delta T$. Az α hőtágulási együttható tipikus értéke vízben $0,0002 \text{ K}^{-1}$, levegőben pedig $0,003 \text{ K}^{-1}$. Ez azt jelenti, hogy 10 fokos hőmérsékletkülönbség vízben csupán 2 ezreléknyi, ill. levegőben 3 százaléknyi sűrűségváltozást jelent. A fentieknek megfelelően a redukált nehézségi gyorsulás $g' = \alpha \Delta T g$, ahol ΔT a melegebb és a hidegebb közeg közötti pozitív

hőmérsékletkülönbség. 10°C -nyi hőmérsékletkülönbség vízben 500-szoros, ill. levegőben 30-szoros redukciót okoz a nehézségi gyorsulásban.

A hőmérsékletkülönbség következtében kialakuló front sebessége az előbbieket alapján $v = (2\alpha \Delta T g h)^{1/2}$. A valóságban megfigyelt frontok sebességére ez a kifejezés jó közelítést ad. Egy 6 fokos hőmérsékletkülönbséggel járó hidegfront esetén pl. a sűrűségkülönbség mindössze 2 %-os, a közel 1 km-es magasság miatt $v = 20 \text{ m/s}$.

A fenti elméleti összefüggés arra az idealizált esetre vonatkozik maradéktalanul, ha a folyadékban fellépő belső sűrűdéstől és a kád falaival való sűrűdéstől egyaránt eltekintünk, továbbá feltételezzük, hogy a két közeg nem keveredik. A valóságban ezek a feltételek nem teljesülnek teljes mértékben, így a mérések során kapott eredmények némileg eltérhetnek az elméleti számításoktól.

A mozgó front határán sokszor, a 8. ábrán látható, jellegzetes fodrozódás figyelhető meg oldalnézetből. Ez a *Kelvin–Helmholtz-instabilitás** következtében kialakuló áramlás, amely két különböző sűrűségű, egymáshoz képest mozgásban lévő réteg határán lép fel, és a relatív sebességtől függő mértékben meggyűri a határfelületet. (Erre a 9. ábrán mutatunk egy szép természeti példát). Minél nagyobb a rétegek egymáshoz viszonyított sebessége, annál nagyobb az instabilitás jellegzetes hullámhossza, és fordítva.

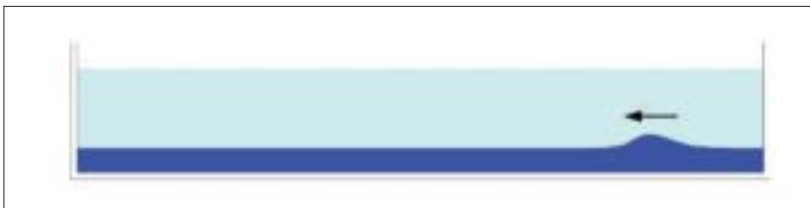
A kísérlet során azt tapasztaljuk, hogy a színek sokáig jól különvál-



8. ábra: A haladó front felső határán a Kelvin–Helmholtz-instabilitás következtében jellegzetes fodrozódás jelenik meg



9. ábra: A felhő alatt és fölött elhelyezkedő levegőréteg egymáshoz viszonyított mozgásának következtében a határfelületen megjelenik a Kelvin–Helmholtz-instabilitásra utaló fodrozódás. (Mátraalja, 2005. augusztus 6., Nagy Zoltán felvétele)



10. ábra: A kád falával való ütközés után egy belső szoliton indul el visszafelé

nak. Keveredés szinte kizárólag a két réteg határán lévő keskeny sávban történik, méghozzá a Kelvin–Helmholtz-instabilitás örvényeinek hatására. Ez a tapasztalat arra utal, hogy a környezeti áramlásokban a keveredés elsősorban hidrodinamikai okokra vezethető vissza, a molekuláris diffúzió (és hasonlóképpen a hődiffúzió is) nagyon lassú folyamatok, és csak nagy időskálán játszanak lényeges szerepet.

Miután a sűrűbb réteg a kád teljes hosszán végigterült, és a túlsó végének ütközve visszaverődött, egy újfajta alakzat jelenik meg: határozott alakú púp indul meg visszafelé a két közeg határán (10. ábra). A szóban forgó alakzat nem más, mint egy *belső szoliton*. A szabad felszíni és a belső szoliton között lényegi különbség nincs, de az utóbbi sebessége a redukált nehézségi gyorsulás miatt sokkal kisebb.

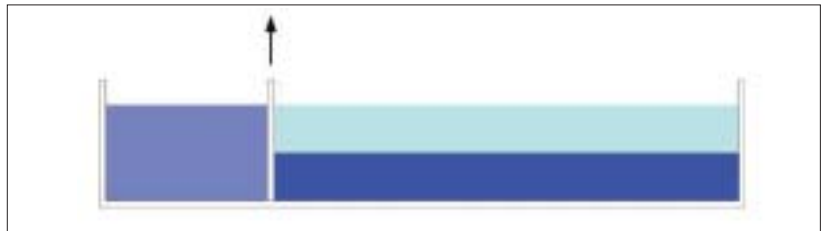
Közbülső front beáramlása

Két egymáson elhelyezkedő réteg határán *közbülső* frontot állíthatunk

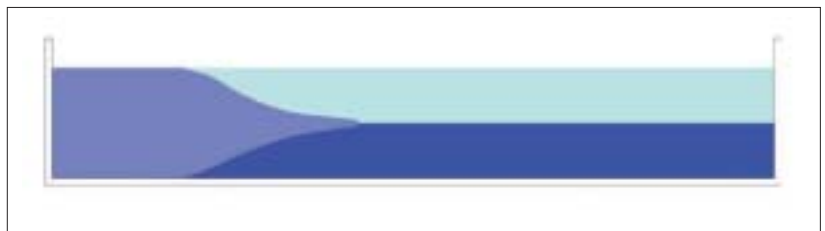
elő. A kád végében válaszfalal le-választjuk a rekeszbe eső rétegzett vizet, majd jól összekeverjük. Eredményképpen a rekeszben a két réteghöz képest köztes sűrűségű folyadékot kapunk (11. ábra). Ezt egyúttal valamilyen új színűre meg is festhetjük a jelenség jó megfigyelhetősége érdekében.

Ezután a szokásos lépés következik: eltávolítjuk a válaszfalat, és figyeljük, mi történik. A köztes sűrűségű folyadék „bekúszik” a nála sűrűbb, ill. ritkább közé (12. ábra). A kísérlet során nem nehéz felismerni a hasonlóságot a légrétegek közé bekúszó felhők alakjával.

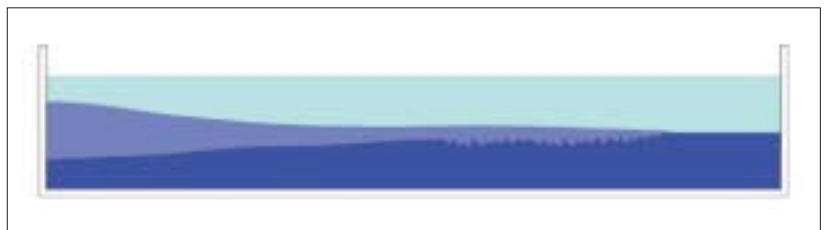
Vannak olyan gyenge frontok, amelyek nem vonulnak végig a kísérleti kádon, hanem útközben lefékeződnek. Jelen kísérletünk éppen egy ilyen folyamatra szolgál példaként. A színes közbülső réteg fokozatosan bekelődik az eredeti két réteg közé, de közben lelassul, egyre vékonyodik, míg végül teljesen lefékeződik. Az eleje ekkorra már



11. ábra: Közbülső front indítása: a bal rekeszben lévő víz a másik két réteghöz képest köztes sűrűségű



12. ábra: A köztes sűrűségű folyadék bekúszik a sűrűbb és a ritkább réteg közé



13. ábra: Az elvékonyodott és megállapodott közbülső réteg alján megjelenő ujjasodás



14. ábra: Mammatusz felhők

olyannyira vékonyra nyúlik, hogy feüllnézetből szinte nem is látszik, legfeljebb egy leheletnyi színárnyalat utal a jelenlétére. Oldalnézetből egy hajszálvékony, éles csíkot látunk, mely néhány perc után érdekes formát kezd ölteni: kitüremkedések jönnek létre az alsó részén (13. ábra), ujjasodási folyamat indul meg (ld. később). Ez a jelenség is szerepet játszhat a mammatusz felhők* kialakulásában (14. ábra).

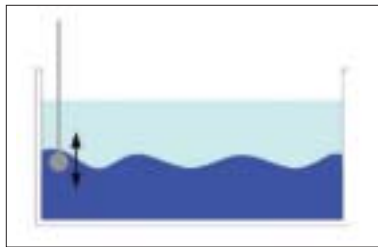
Belső hullámok két közeg határán: a „holt víz”-effektus

Ha a korábban bemutatott kísérletek bármelyikében megbolygatjuk a rétegek közti határfelületet, hullámzás indul meg. Ez a hullámmozgás azonban csak a szóban forgó határfelületen figyelhető meg, a felszín eközben teljesen mozdulatlanak mutatkozik. Érdekes e furcsa jelenségnek, a *belső hullámoknak* külön figyelmet szentelnünk.

A kísérlethez használt üvegvadba két folyadék réteget töltünk (15. ábra). Ha a 16. ábrán feltüntetett módon zavart keltünk a határfelület közelében, hullámmozgás indul, de a határfelület továbbra is éles (és stabil) marad: nem keveredik, csupán hullámzik.



15. ábra: Két rétegben feltöltött kád



16. ábra: A henger fel-le mozgásával belső hullámok keletkeznek, eközben a felszín mozdulatlan marad

Ez a lassú, lomha hullámzás hosszú ideig tart, a súrlódás nem nagyon fékezi. A hullám fázissebességét a $c=(g'h')^{1/2}$ összefüggés adja meg, ahol g' a korábban megismert redukált nehézségi gyorsulás, h' pedig az alsó réteg h_1 és a felső réteg h_2 vastagságának harmonikus átlaga: $h'=(h_1h_2)/(h_1+h_2)$. A redukált nehézségi gyorsulás (g') korábban megadott definíciójából látszik, hogy értéke egyenesen arányos a két réteg sűrűségkülönbségével, ezért sűrűségkülönbség hiányában $g'=0$, és így $c=0$, vagyis rétegzettség hiányában belső hullámok sem jöhetnek létre. Mivel a természetes vizekben néhány ezrelékes sűrűségkülönbség a tipikus, a belső hullámok mintegy 30-szor lassabbak a külső, felszíni társaiknál. Fontos hangsúlyozni, hogy a

belső hullámzást kísérő felszíni mozgás általában elhanyagolható amplitúdójú.

A természetben gyakran találunk belső hullámok jelenlétére utaló példákat. Az óceánban és az atmoszférában is aktív mozgások mehetnek végbe a látszólagos nyugalom ellenére. Előfordul, hogy egy tengeren haladó hajó hirtelen lelassul, mintha megfeneklett volna, annak ellenére, hogy alatta a víz nagyon mély, az időjárás tiszta, a tenger felszíne pedig nyugodt. Angolul „dead water” („holt víz”) hatásnak nevezik ezt a jelenséget.

A 17. ábra segít a jelenség megértésében: a tenger felszínén, pl. folyótorkolatok közelében egy sekély, viszonylag kis sűrűségű vízréteg helyezkedik el, amely az alatta lévő, sűrűbb sós víztől éles határfelülettel különül el. Ha ebben a felső rétegben egy hajó halad, akkor teljesítményének egy bizonyos részét arra fordítja, hogy az említett határfelületen belső hullámokat keltsen. Ezt a teljesítményvesztéset észlelik fékező hatásként a hajón utazók.

Az ilyen hullámok valóban nemigen látszanak a víz felszínén, valami azonban mégis utal rájuk: rövid kapilláris hullámok jelenléte jelzi egy-egy belső hullámhegy helyét. Mindez, ha közlőrl nem is, de a magasból, például repülőgépről nyomon követhető.

Az atmoszférában is fellépnek aktív mozgások az eltérő sűrűségű légrétegek között. Az ezek által keltett belső hullámzásra utal a 18. ábrán látható csíkos felhőmintázat, ilyeneket repülőgépről különösen



17. ábra: „Holt víz” hatás. A hajó belső hullámokat kelt a határfelületen, ezáltal lefékeződik

jól megfigyelhetünk. A belső hullámzás következtében az eredetileg vízszintes légréteg egyes részei magasabbra kerülnek, ahol az alacsonyabb hőmérséklet hatására a vízpára kicsapódik. A felülnézetből látható csíkok tulajdonképpen a hullámhegyek tetejének felelnek

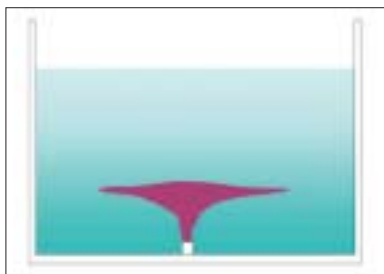


18. ábra: Belső hullámok jelenlétére utal a csíkos felhőmintá

meg. Ez a légköri példa azt mutatja, hogy belső hullámok nem csak éles réteghatáron, hanem folytonosan változó sűrűségű közegben is létrejöhetnek.

Szennyezések lokális terjedése: turbulens fáklya, kéményfüst

Ha nincs jelen semmiféle zavaró légmozgás, rétegzett közegben a füst előbb egyenesen felfelé száll, majd egy bizonyos magasságot elérve szétterül, mintha láthatatlan mennyezet állná útját. Hasonló jelenség figyelhető meg vulkánok kitörésekor is. Homogén levegőben a kéményfüst tetszőlegesen magasra felszállhatna, az imént említett alakzat ott nem jöhetne létre. Ismét



19. ábra: Kéményfüst-jelenség: folytonosan rétegzett sós vízben felfelé áramló kisebb sűrűségű folyadék gomba formájú képződményben terül szét

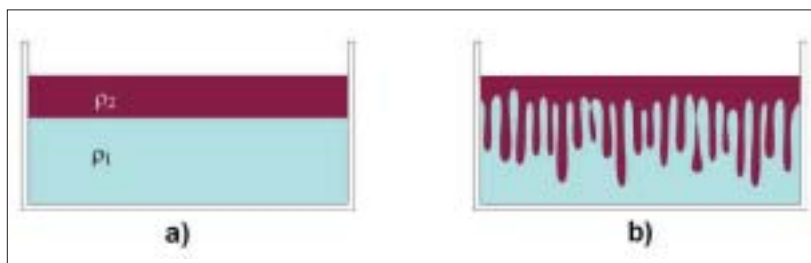
kulcsfontosságú szerepet játszik tehát a levegő rétegzettsége.

Folyamatosan csökkenő sűrűségű levegőben a felfelé szálló füstnek mindenképpen meg kell állnia ott, ahol a sajátjával azonos sűrűségű levegőt talál. De mivel a füst turbulens feláramlása közben összekeveredik a környező sűrűbb levegővel, ezért sűrűsége fokozatosan nő, és így lényegesen kisebb magasságban éri el a gravitációs egyensúlyi állapotot.

A jelenséget a laboratóriumban az alábbi módon tanulmányozhatjuk. Egy folytonosan rétegzett, lefelé egyenletesen növekvő sűrűségű, sós vízzel feltöltött tartályból egy kevés vizet szívunk ki, mégpedig a felszín közeléből. A kivett vizet enyhén megfestjük, hogy a jelenség szemmel követhető legyen, majd egy hajlított végű üvegcsőben

at, azaz erősítik egymás hatását. Előfordulhat azonban az is, hogy egymással ellentétes irányúak. A természetben valóban létezik ilyen elrendeződés: a napsugárzás melegíti a tenger felszínét, ezáltal csökken a felszíni réteg sűrűsége. Ugyanakkor a párolgás miatt a sókoncentráció növekszik a felszíni réteg sűrűségével együtt. Mi történik ekkor?

Ezt vizsgáljuk következő kísérletünkben, melynek során alkalmas módon színezett, meleg, sós vizet töltünk hideg, tiszta víz fölé (20. a ábra). Ekkor a hőmérséklet okozta sűrűséggradiens lefelé, a sókoncentráció okozta sűrűséggradiens fölfelé irányul; az előbbi segíti, az utóbbi gátolja a rétegződés stabilitását. Ha tehát a hőmérséklet hatása az erősebb, az elren-



20. ábra: a) Festett, meleg, sós vizet rétegzettünk hideg, tiszta víz fölé, az elrendeződés kezdetben stabil; b) A felső réteg lehűlése következtében az elrendeződés instabillá válik, sós „ujjak” keletkeznek

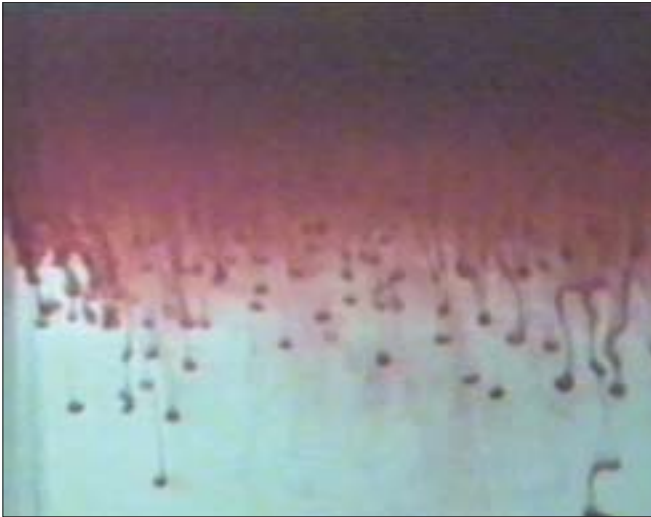
végződő, csappal ellátott alkalmas eszközzel a színes vizet visszaengedjük a kádba, mélyebbre, mint ahonnan kivettük. A színes víz föláramlik, kissé „túlló” a végső megállapodási szinten, majd oda nyomban visszaesik, és szétterül (19. ábra). Nem jut el azonban abba a magasságba, ahonnan származik: esetenként annak körülbelül a negyedéig ér csak el, és ebben a színezőanyag elhanyagolhatóan kicsi szerepet játszik.

Ujjasodás

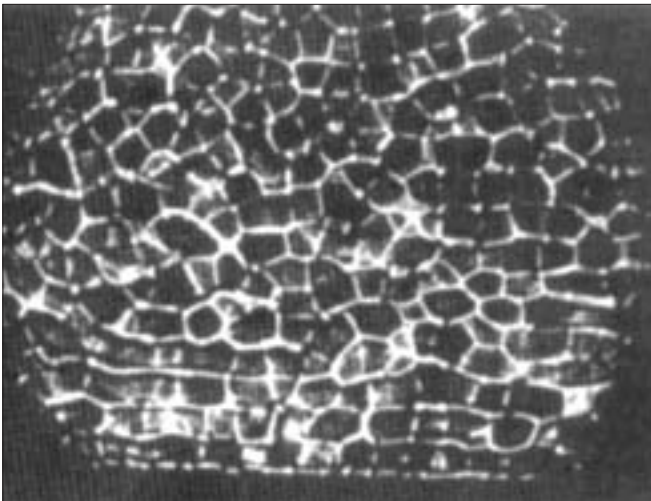
Sűrűséggradienst a tengerben a sókoncentráció és hőmérséklet mélység szerinti változása okoz. Általában a koncentráció- és hőmérsékletgradiens egy irányba mu-

deződés stabil, legalábbis kezdetben.

A felső réteg azonban hűlni kezd, miközben sótartalmát jól megőrzi, így sűrűsége hamar meghaladja az alatta lévő réteget, vagyis a sűrűbb réteg lesz a hígabb tetején. Ez azt eredményezi, hogy a két réteg határán megjelenő kis kitérések elkezdnek növekedni, azaz instabilitás lép fel. A kísérleti edényben jól látszik az instabilitás további fejlődése: a felső rétegből vékony, néhány milliméter vastagságú sós „ujjak” indulnak meg lefelé, közöttük pedig a tiszta víz törekszik felfelé (20. b, ill. 21. ábra). Vízszintes szerkezetük is érdekes: felülnézetből rácsszerű mintázatot látunk (22. ábra).



21. ábra: Laboratóriumi felvétel a sós „ujjakról”



22. ábra: A sós ujjak felülnézetből rácsszerű mintázatot alkotnak (Tritton, 1988)

Jégtömb olvadása folytonos rétegzettségű közegben

Ennek a természeti jelenségnek a bemutatásához egy nagyobbacska, festett vízből fagyasztott jégtömbre van szükség. Célszerű egy nehezeket a tömb egyik végébe befagyasztani. A színes jégtáblát folytonosan rétegzett sós vízzel töltött kádba állítjuk (23. ábra). Ilyen módon ismét kétféle gradiens együttes hatása érvényesül a folyadékban, de most egymásra merőleges irányban: a sókoncentráció változásából származó, függőleges irányú sűrűséggradiens, ill. a jég és víz közötti hő-

mérsékletkülönbség okozta vízszintes irányú hőmérsékletgradiens.

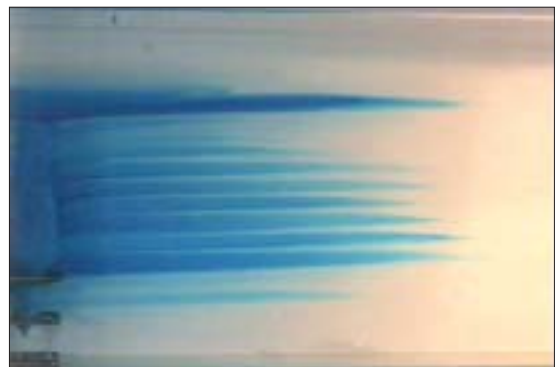
A jégtömb olvadni kezd, és mellette felfelé áramlás jön létre, mivel az olvadó jég anyaga a sós rétegek-nél könnyebb (noha hidegebb) tiszta víz. A „kéményfüst” kísérlethez hasonlóan ugyanis a turbulens feláramlás erős környezeti keveredéssel jár együtt, így a kezdetben édes olvadó víz hamarosan jelentős só-tartalomra tesz szert. Emiatt a folyadék néhány centiméteres emelkedés után gravitációs egyensúlyi helyzetbe kerül, a további emelkedés leáll, csak oldalirányú áramlás marad fenn. A kísérlet azt mutatja,



23. ábra: Festett jégtömböt állítunk folytonosan rétegzett sós vízbe. Így egyszerre van jelen sókoncentráció- ill. hőmérsékletgradiens



24. ábra: A jégtömb olvadásával járó áramlások vízszintes „nyelveket” formálnak



25. ábra: Laboratóriumi felvétel a folytonosan rétegzett sós vízbe állított színes jégtömb olvadása révén létrejött „nyúlványokról”

hogy ez a vízszintes áramlás nem a kád teljes mélységét kitöltő egyetlen vízkörzéseként valósul meg, hanem sok vékony, egymás alatti és egymástól jól elkülönülő sávban: szabályos vastagságú vízszintes nyelvek nyúlnak ki a jégtömbből (24. ábra), melyekben a hideg folyadék kifelé áramlik (25. ábra). Ilyen áramlás jön létre jéghegyek olvadásakor is.

**Gyüre Balázs, Jánosi Imre,
Szabó K. Gábor és Tél Tamás
ELTE Fizikai Intézet,
Környezeti Áramlások Kármán
Laboratórium**