

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

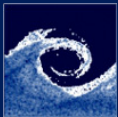
Hatások

Határréteg

Lamináris és turbulens áramlások, határrétegek

Balogh Miklós
Áramlástan Tanszék

2015. október 29.



Örvénylő áramlások

Turbulencia

Balogh
Miklós

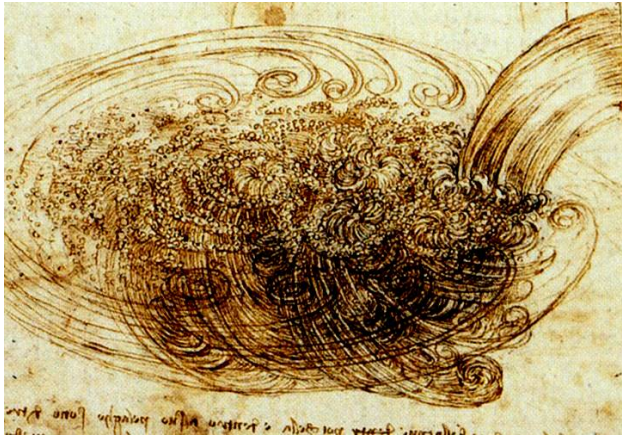
Bevezető

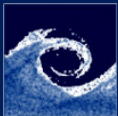
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





Örvénylő áramlások

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

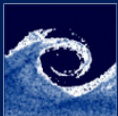
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





Reynolds kísérlet (1883)

Turbulencia

Balogh
Miklós

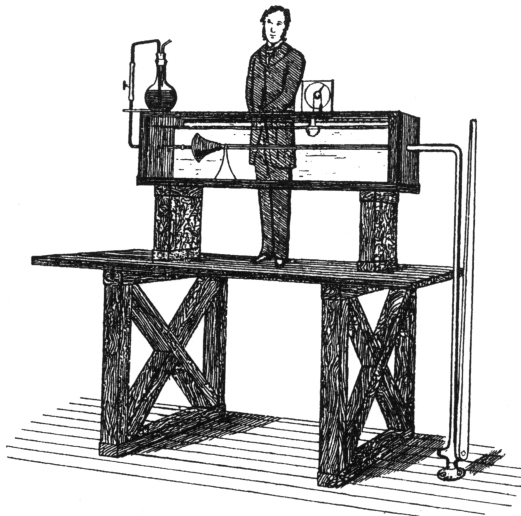
Bevezető

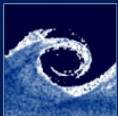
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





Az áramlások jellemzésére - Reynolds szám

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

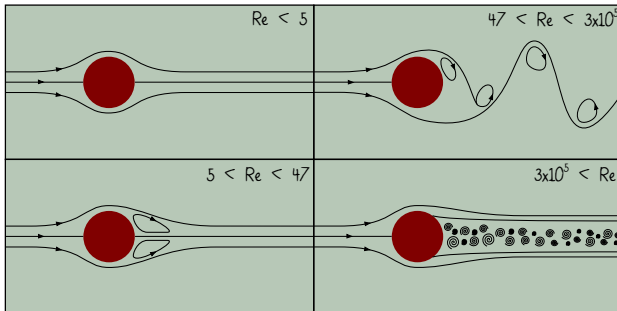
Lamináris

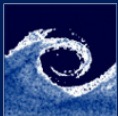
Turbulens

Hatások

Határréteg

- Reynolds szám: $Re = \frac{vL}{\nu}$
- Lamináris réteges áramlások ($Re < 2300$)
- Turbulens áramlások (tranzien, $Re > 2300$)





Lamináris és turbulens áramlás

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

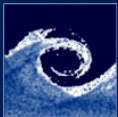
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

- Lamináris (réteges): Szabályosan változó áramlástani jellemzők (nyomás, sebesség), amely réteges szerkezetet mutat. Ha időben és térben változást mutat, az jól jellemezhető.
- Turbulens (örvénylő): Kaotikusan, sztochasztikusan változó áramlástani jellemzők, szerkezetének leírása meglehetősen bonyolult:
 - Tranziens, térben és időben igen változékony
 - 3D (akkor is, ha a főáramlás 2D)
 - Örvényes, nagy a Reynolds szám
 - Disszipatív (viszkózus feszültségek: mozgási energiából hő)
 - Erősen diffúzív (gyors keveredés)



Lamináris áramlás

Turbulencia

Balogh
Miklós

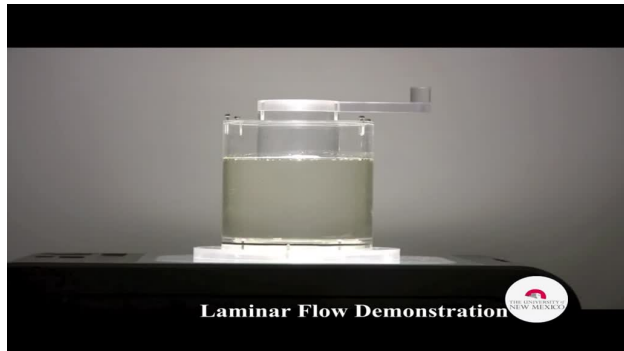
Bevezető

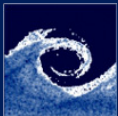
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





Turbulens vagy lamináris?

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

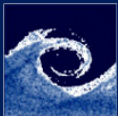
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





Lamináris áramlás csőben

Turbulencia

Balogh
Miklós

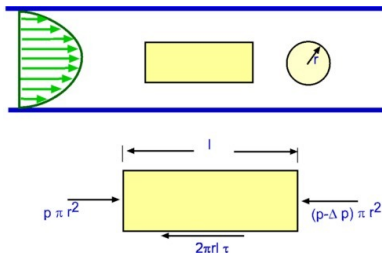
Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

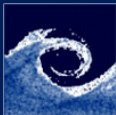


- A kontroll térfogatra felírt egyensúly:

$$p\pi r^2 - \left(p - \frac{dp}{dx} dx \right) \pi r^2 = \tau 2\pi r dx$$

- Rendezve és alkalmazva Newton viszkozitási törvényét:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 2\tau = 2\mu \frac{dv}{dr} \rightarrow \frac{dv}{dr} = \frac{r}{2\mu} \frac{dp}{dx}$$



Lamináris áramlás csőben

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

Határérték

- Integrálva az egyenletet (szétválasztható):

$$\int 1 dv = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} \int r dr \rightarrow v(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} r^2 + K$$

- Alkalmazzuk a tapadás törvényét, mint peremfeltételt:

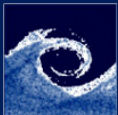
$$v(R) = 0 \rightarrow K = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} R^2$$

- Vegyük figyelembe, hogy a nyomásgradiens kiszámolható a cső hosszából és a nyomáskülönbségből:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\Delta p}{L}$$

- A sebesség a sugár függvényében ebből:

$$v(r) = \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} (r^2 - R^2) = \frac{1}{4\mu} \frac{\Delta p}{L} (R^2 - r^2)$$



Lamináris áramlás csőben

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

- Kiemelve R^2 -et:

$$v(r) = \frac{R^2}{4\mu} \frac{\Delta p}{L} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

- A maximális sebesség ($r = 0$ esetén):

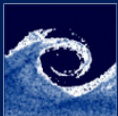
$$v_{max} = v(0) = \frac{R^2}{4\mu} \frac{\Delta p}{L}$$

- A sebességprofil:

$$v(r) = v_{max} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

- Integrálva a sebességprofil megmutatható:

$$\bar{v} = \frac{v_{max}}{2}$$



Turbulens áramlások

Turbulencia

Balogh
Miklós

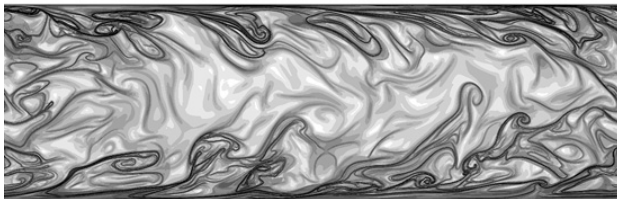
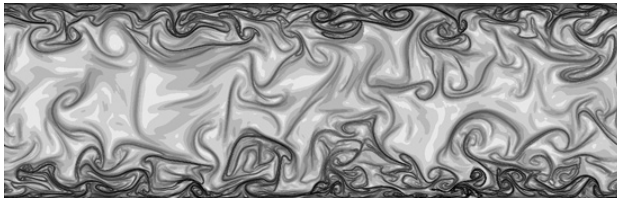
Bevezető

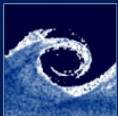
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





Turbulens kaszkád

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

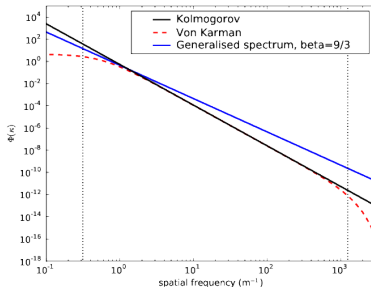
Lamináris

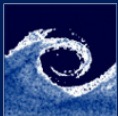
Turbulens

Hatások

Határréteg

„Big whorls have little whorls
That feed on their velocity,
And little whorls have lesser whorls
And so on to viscosity.,,
Lewis Fry Richardson





Reynolds átlagolt Navier–Stokes egyenletek (RANS)

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

Lamináris

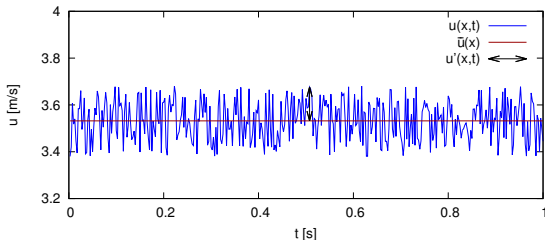
Turbulens

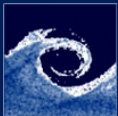
Hatások

Határréteg

A teljes N–S egyenletrendszer numerikusan nehezen kezelhető

- Felbontjuk a változókat, pl. $u(x, t) = \bar{u}(x) + u'(x, t)$
- Visszahelyettesítés után időben átlagoljuk az egyenleteket
- Az átlagolt egyenletek nem zártak, a látszólagos feszültségeket modellezzük (turbulencia modellekkel)
- Bousinesq közelítés – örvényviszkozitás: $\mu + \mu_t$





Turbulencia modellezése

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

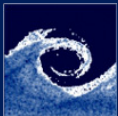
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

- Algebrai modellek: lokális sebesség + hosszlépték
- Reynolds átlagolt modellek (URANS, RANS):
 - Spalart–Allmaras: 1 egyenlet (szárnyak)
 - $k - \epsilon$ modell: 2 egyenlet (izotróp turbulencia)
 - $k - \omega$ modell: 2 egyenlet (viszkózus alapréteg, tranzíció)
 - RSM modell: 7 egyenlet (anizotrop turbulencia, szekunder áramlás)
- Turbulens struktúrák felbontására épülő modellek:
 - DNS: Felbontott turbulencia (Kolmogorov μ -skála)
 - LES: Nagy örvények felbontása + subgrid modell
 - DES: Fal közelében URANS + távol-térben LES (SAS)



Turbulencia modellezése

Turbulencia

Balogh
Miklós

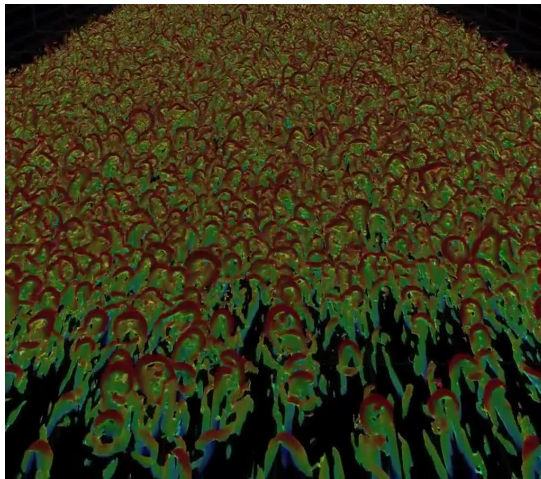
Bevezető

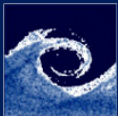
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





Turbulencia hatása a transzportfolyamatokra

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

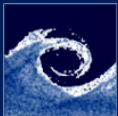
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

- Lamináris áramlások
 - Örvénymentesek
 - Molekuláris diffúzió és az advekció dominál
 - A keveredés lassú
 - Advekció dominál
 - Példa: oldódás nyugvó folyadékban
- Turbulens áramlások
 - Örvénytételek: örvények szállítják a tulajdonságokat
 - Örvényes áramlás (turbulens kaszkád)
 - Turbulens diffúzió dominál
 - Intenzív keveredés
 - Példa: oldódás kavargó folyadékban



Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

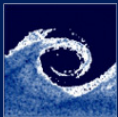
Entry #: V84181

Spatially developing turbulent boundary layer on a flat plate

J.H. Lee, Y.S. Kwon, N. Hutchins and J.P. Monty

Department of Mechanical Engineering
The University of Melbourne





Határréteg

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

Lamináris

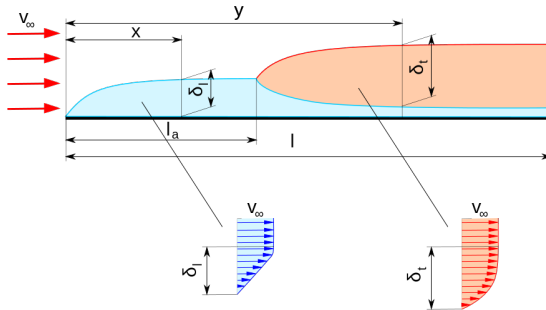
Turbulens

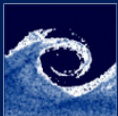
Hatások

Határréteg

Áramlásba helyezett test szilárd felületén kialakuló réteg

- Belső súrlódás (viszkozitás) dominál
- Torlópontban és a felületen a sebesség zérus
- A felülettől távolodva a sebesség növekszik
- Az ideálistól eltérő réteg a határréteg





Transzport a határrétegben

Turbulencia

Balogh
Miklós

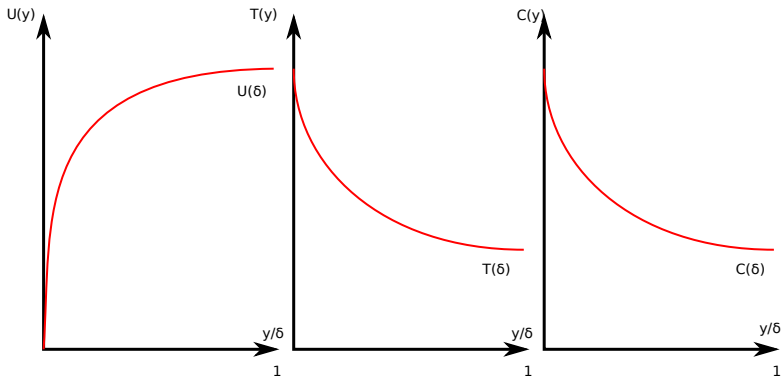
Bevezető

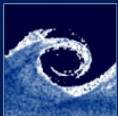
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





Ellenállás - Reynolds szám

Turbulencia

Balogh
Miklós

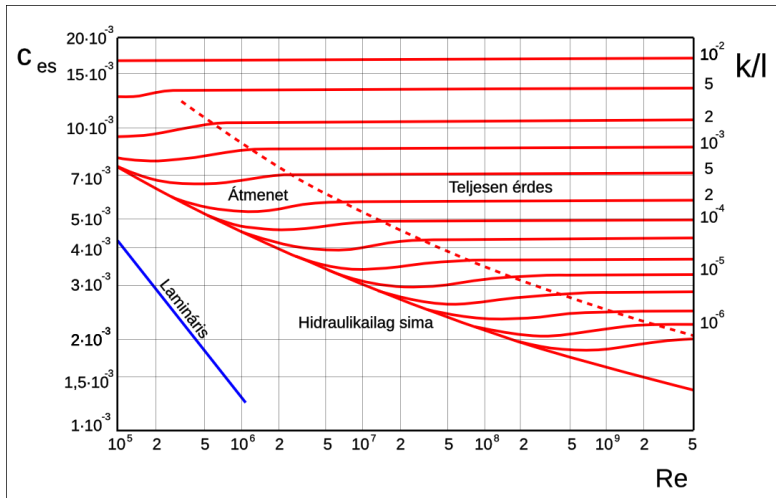
Bevezető

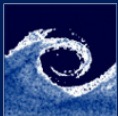
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határérték





Határréteg leválás

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

Lamináris

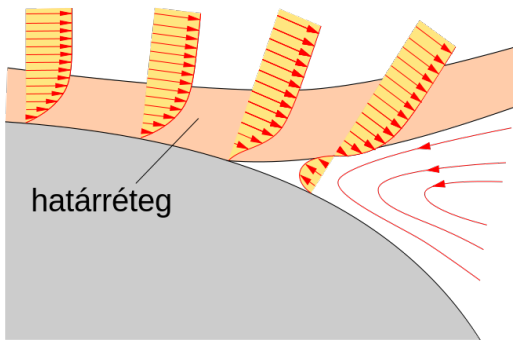
Turbulens

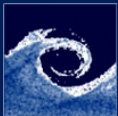
Hatások

Határréteg

Leválás: visszaáramlás (örvények) a felület mentén

- Hirtelen lassuló áramlás (pl. íveltség miatt)
- Növekvő nyomás irányában áramló közeg





Határréteg leválás megakadályozása

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

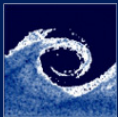
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

- Csúsztatófeszültség csökkentése
- Nyomás-változás csökkentése (íveltség csökkentése)
- Telt sebességmegoszlás létrehozása
 - határréteg elszívás
 - határréteg gyorsítás
 - határréteg frissítés
 - aktív áramlás-szabályozás
- A határréteg leválás káros, megszüntetése növeli berendezéseink hatásfokát, csökkenti a veszteségeket!



Határréteg leválás – példák

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

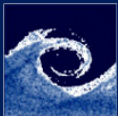
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





Határréteg leválás – példák

Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

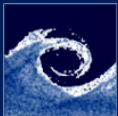
Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg





Turbulencia

Balogh
Miklós

Bevezető

Lamináris

Turbulens

Hatások

Határréteg

Köszönöm a figyelmet!