

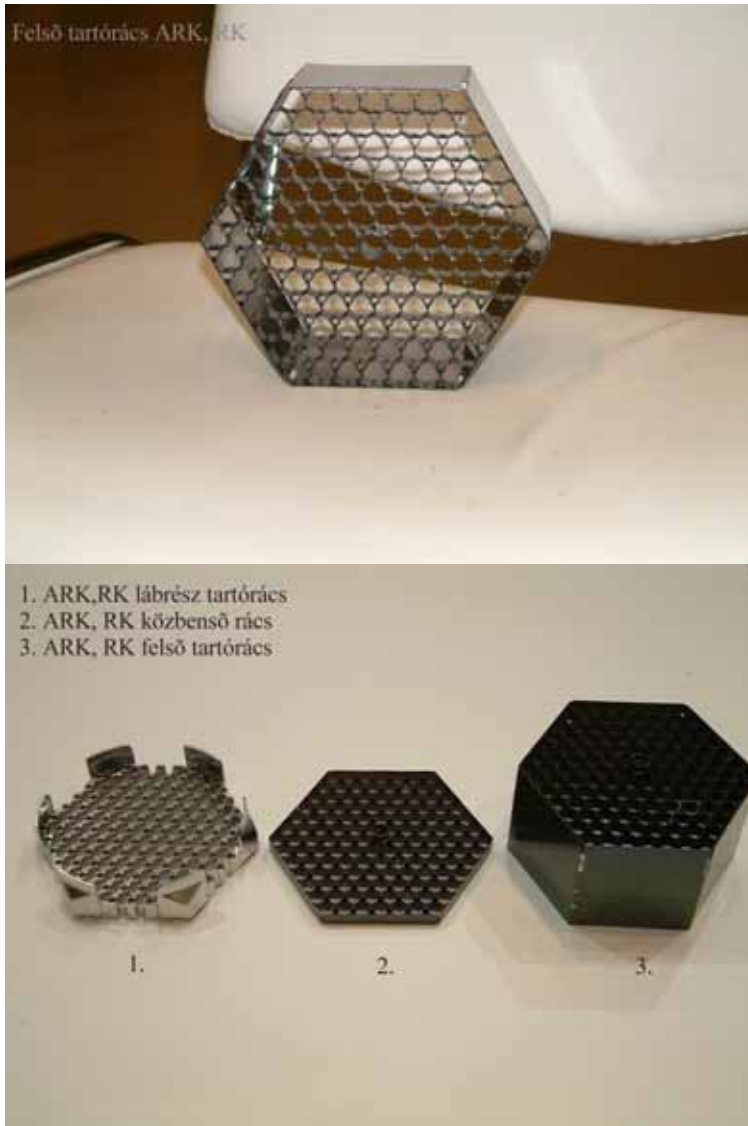
Turbulens áramlás modellezése háromszög elrendezésű csőkötegben

Mayer Gusztáv
mayer@sunserv.kfki.hu

Tartalom

- Vizsgált geometria
- Motiváció
- Az áramlás jellemzői
- Saját fejlesztésű kód a probléma vizsgálatára
- Direkt numerikus szimuláció
- Nagy örvény szimuláció
- K-epszilon modell és Reynolds feszültség transzport modell CFD kódokban

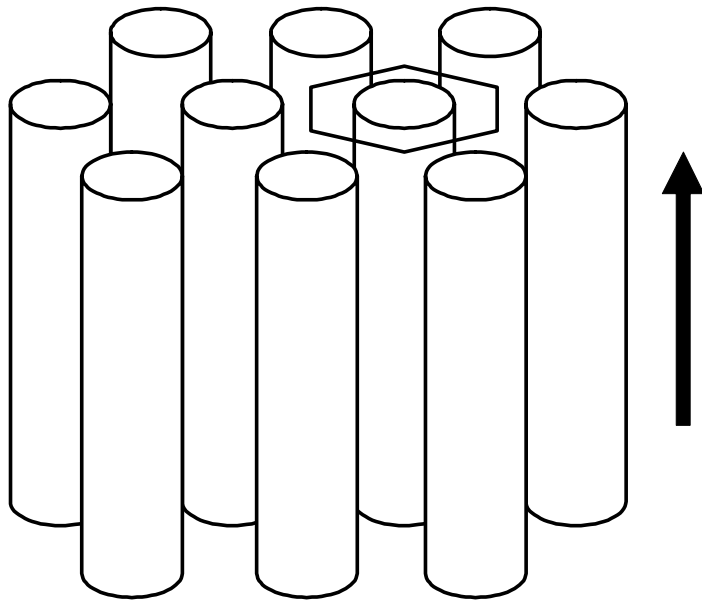
VVER-440 típusú fűtőelem és távtartó



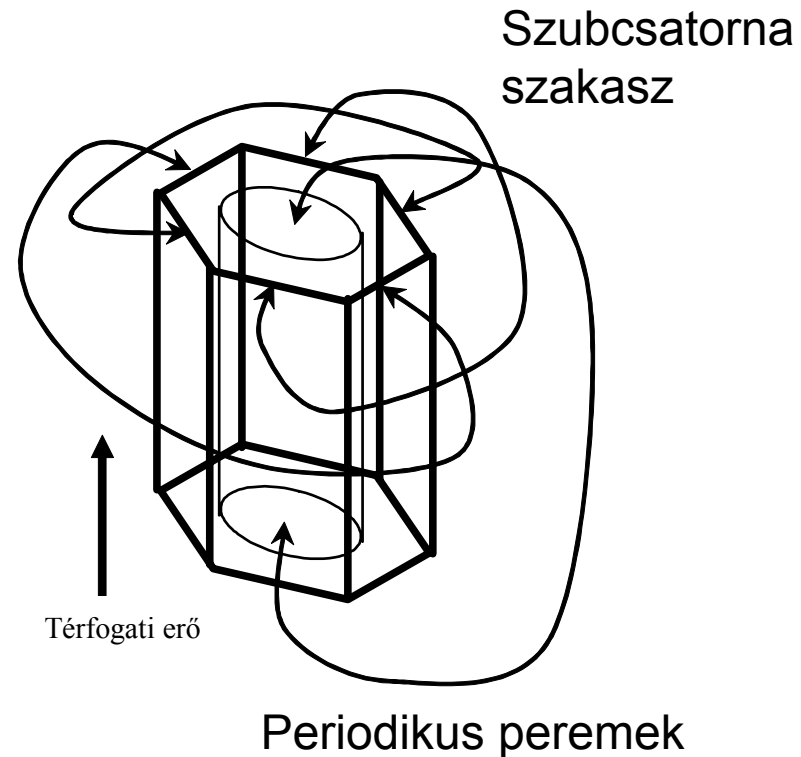
Motiváció

- Milyen termohidraulikai folyamatok zajlanak le egy üzemanyag kazettában
 - Mit mér egy termoelem egy üzemanyag kazetta fejben?
 - Használhatók a CFD kódok által adott információk?
 - Hogyan használjuk a CFD-t?

Háromszög elrendezésű csőköteg

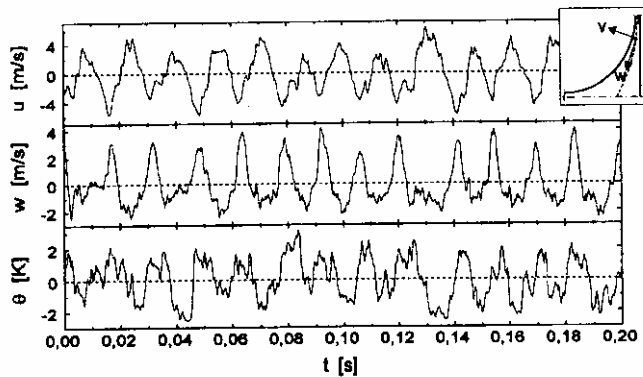


A vizsgált térfogat

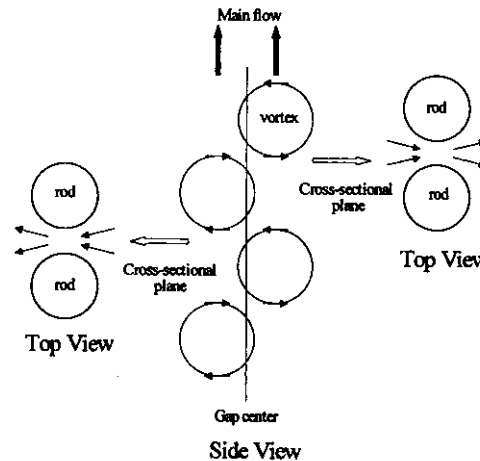


Az áramlás jellemzői:

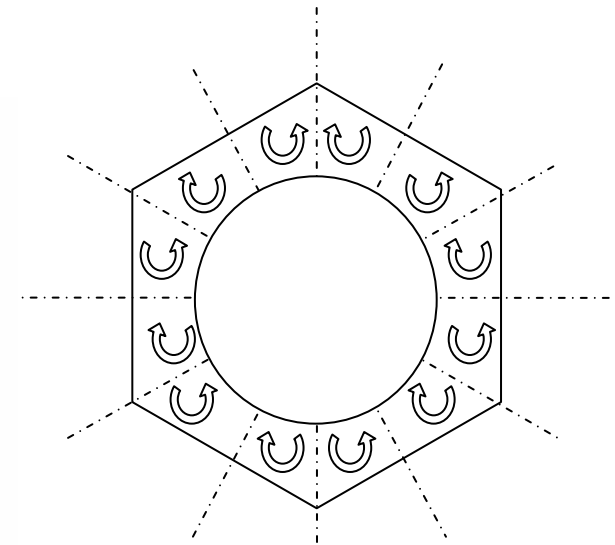
- Reynolds szám ($\sim 300,000$)
- Másodlagos áramlás
 - (mérés, analitikus, numerikus megfigyelés)
- Áramlási pulzáció jelenléte



Krauss, Meyer, Nuc. Engineering and Design, 1998



Kim, Chung, Nuc. Engineering and Design, 2001



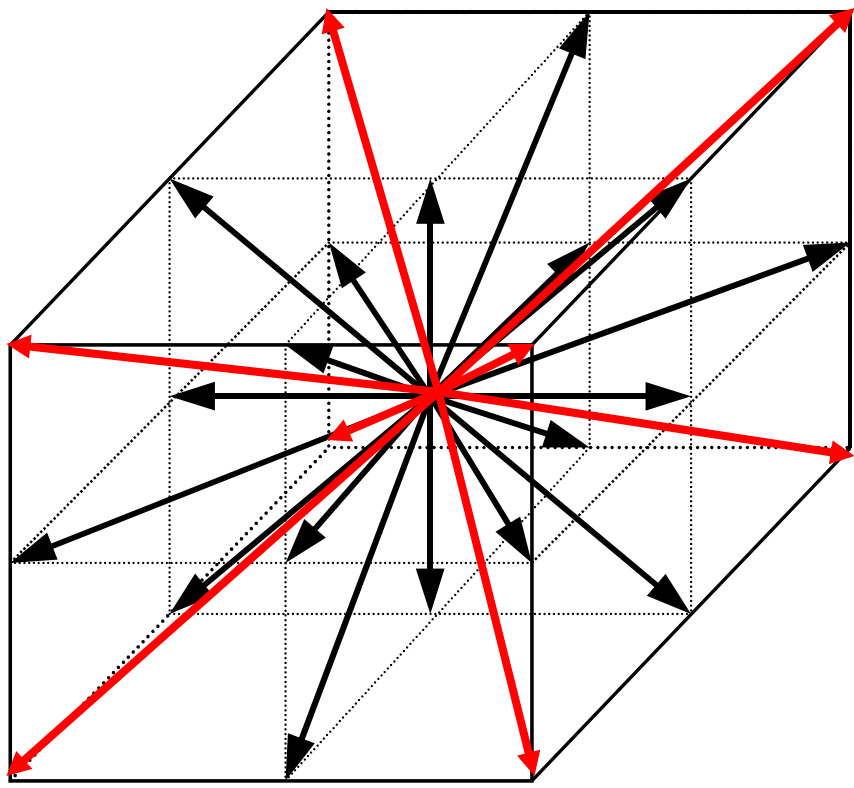
Az AEKI-ben kifejlesztett kód

- Rács Boltzmann módszer
 - Alkalmas a Navier-Stokes egyenletek numerikus megoldására
 - Másodrendű pontosságú módszer
 - Viszonylag könnyen kiterjeszthető kétfázisú áramlások vizsgálatára
 - Numerikus kísérletek és analitikus eredmények bizonyítják, hogy turbulens áramlások modellezésére alkalmas (Házi G., Jiménez C., 2005 , Comp. Fluids; Házi G. 2005, Phys. Rev. E.)

Alkalmazott rácsok 3D (egyenközű)

Minden egyes irányhoz tartozik egy eloszlásfüggvény

D3Q19 és D3Q27



$$f_i(\mathbf{r} + \mathbf{c}_i, t + 1) - f_i(\mathbf{r}, t) = \Omega(f_i) \quad \text{rács Boltzmann egyenlet}$$

$$\mathbf{c}_i = \begin{cases} (0,0) & i = 0 \\ (\cos[(i-1)\pi/2], \sin[(i-1)\pi/2]) & i = 1,2,3,4 \\ (\cos[(i-5)\pi/2 + \pi/4], \sin[(i-5)\pi/2 + \pi/4])\sqrt{2} & i = 5,6,7,8 \end{cases}$$

D2Q9 modell esetén

Kis Knudsen és Mach számok esetén:

$$f = f_{eq} + f_{neq}, \quad \text{ahol} \quad f_{neq} \ll f_{eq}$$

Az ütközési operátort sorbafejtve az egyensúlyi eloszlás körül, megkapjuk a lin. Ütk. mátrixot, amely további egyszerűsíthető :

$$\Omega_i = -\frac{1}{\tau} (f_i - f_{i,eq})$$

BGK ütk. op. Bathnagar, 1954 ;
Qian 1992;

Feltételezve, hogy a sebesség eloszlásunk Maxwell-Boltzmann eloszlás, eljuthatunk az egyensúlyi eloszlás következő alakjához:

$$f_{i,\text{eq}}(\rho, \mathbf{u}) = \rho t_i \left[1 + \frac{1}{c_s^2} (\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u}) + \frac{1}{2c_s^4} (\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{u})^2 - \frac{1}{2c_s^2} u^2 \right]$$

A Champman Enskog sorfejtést alkalmazva származtathatók a Navier-Stokes egyenletek, amiből a viszkozitás értékek adódnak.

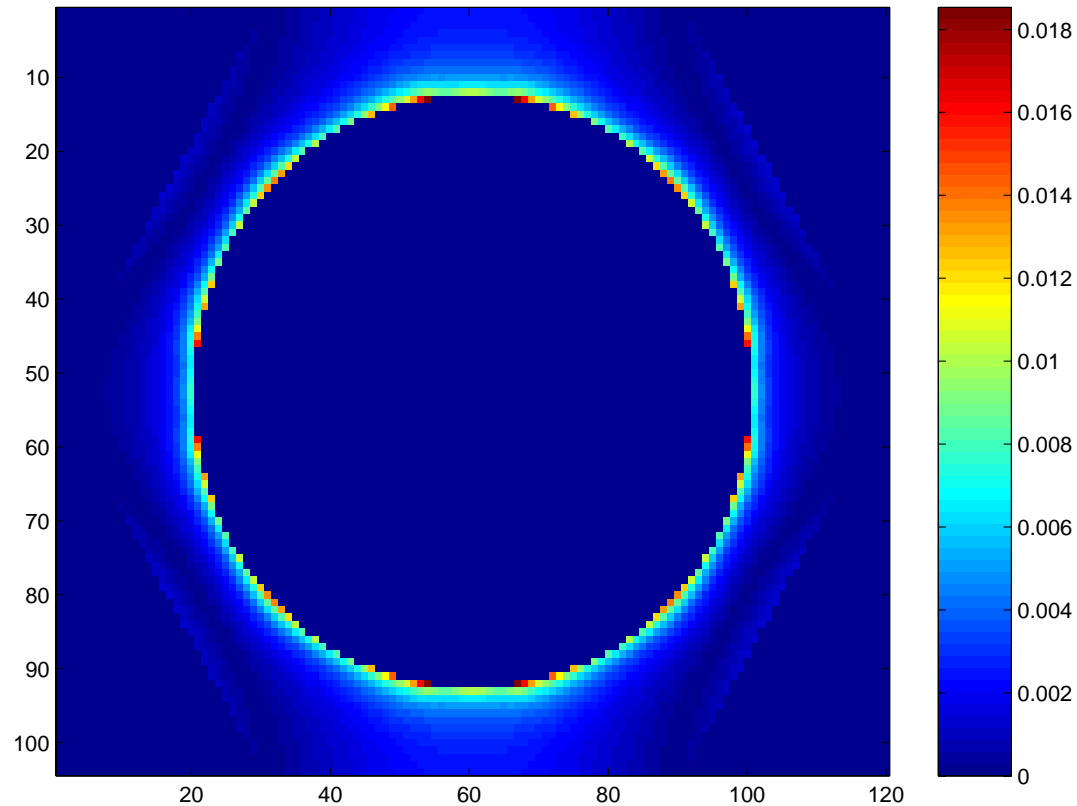
$$\rho = \sum_i f_i \quad \rho u_\alpha = \sum_i f_i (\mathbf{c}_i)_\alpha \quad \rho \kappa = \frac{1}{2} \sum_i (\mathbf{c}_i \cdot \mathbf{c}_i)_\alpha f_i$$

$$c_s = \sqrt{1/3}$$

$$p = c_s^2 \rho$$

$$\nu = \frac{1}{3} \left(\tau - \frac{1}{2} \right)$$

Analitikus eredménnyel történő összehasonlítás állandósult, lamináris esetben

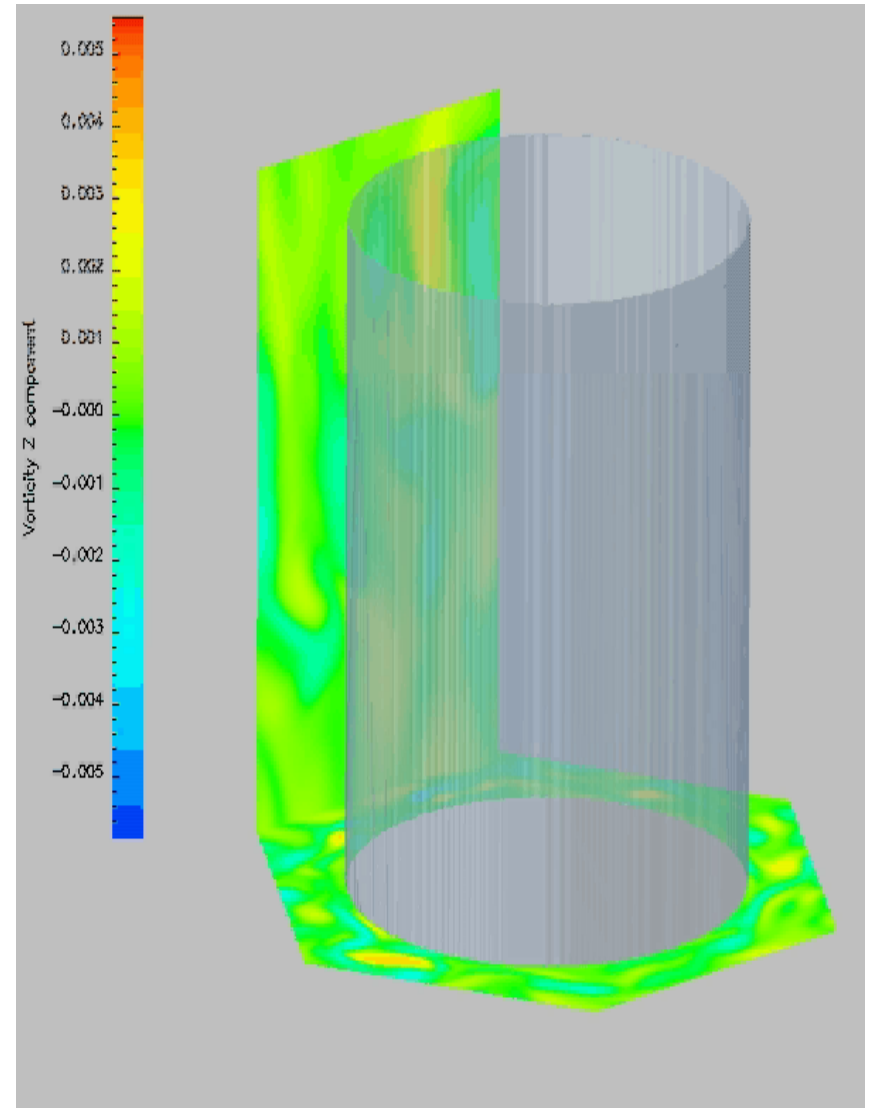
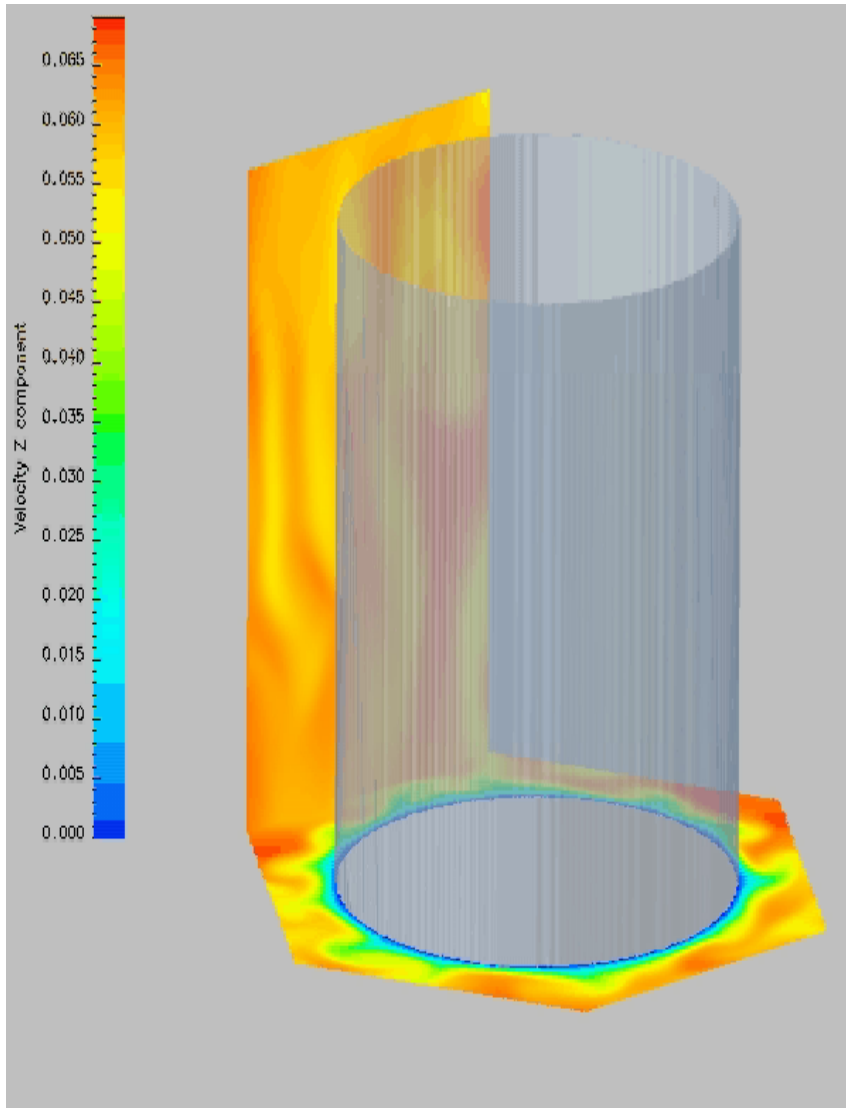


Relatív hiba

Direkt numerikus szimuláció (DNS)

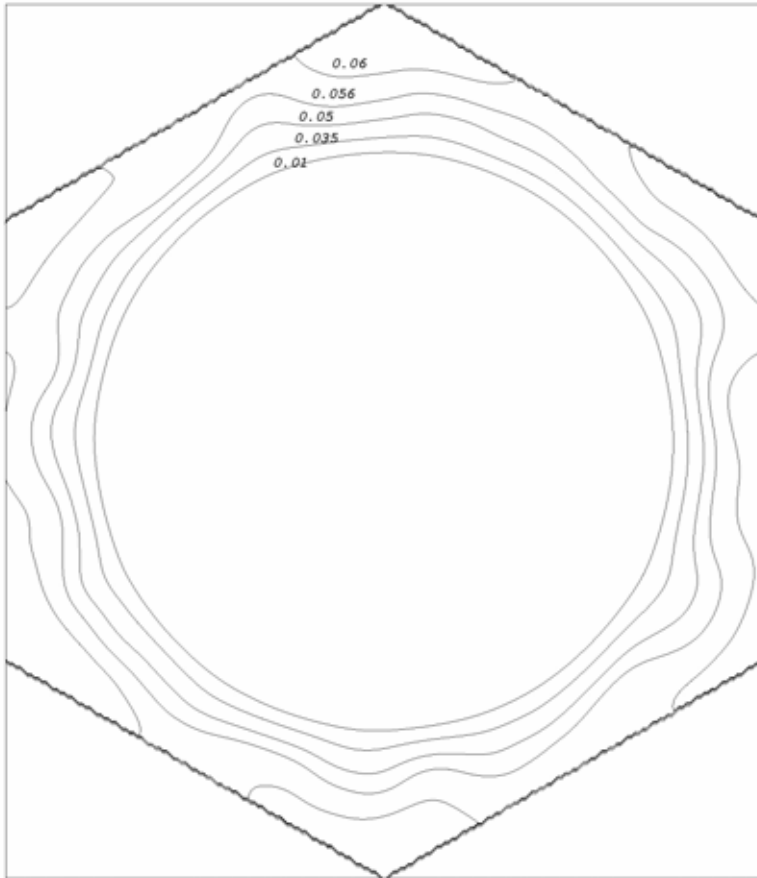
- DNS-ben egyáltalán nem használunk modellt
- Csak kis Re számú áramlást tudunk modellezni
- A DNS alkalmas az áramlás alapvető tulajdonságainak megismerésére
- Hasznos amikor a Re szám effektusok nem jelentősek

DNS

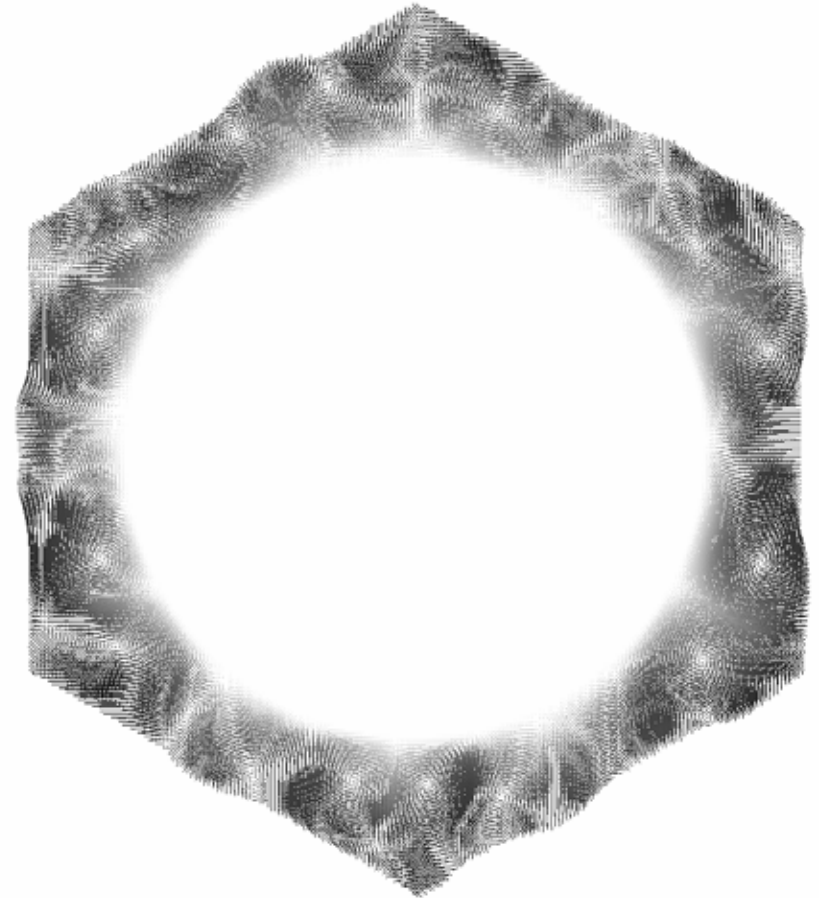


DNS

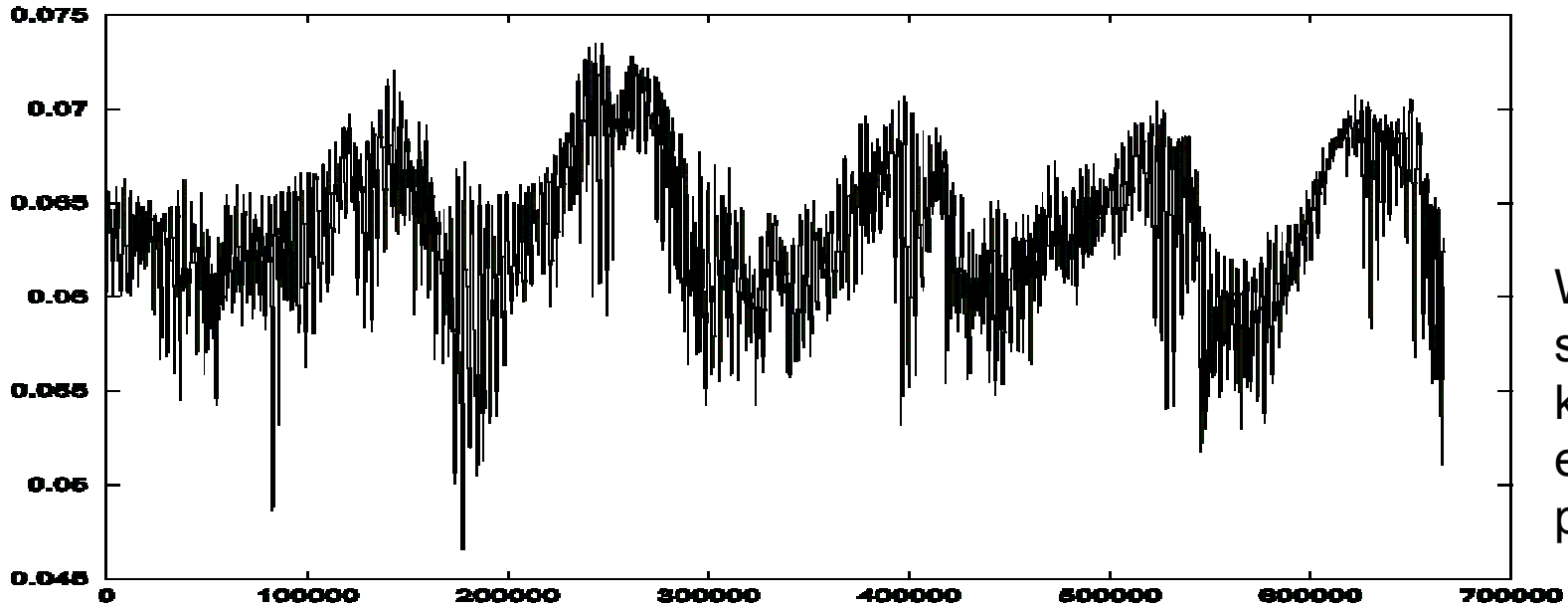
Az axiális átlagsebesség
kontúrja



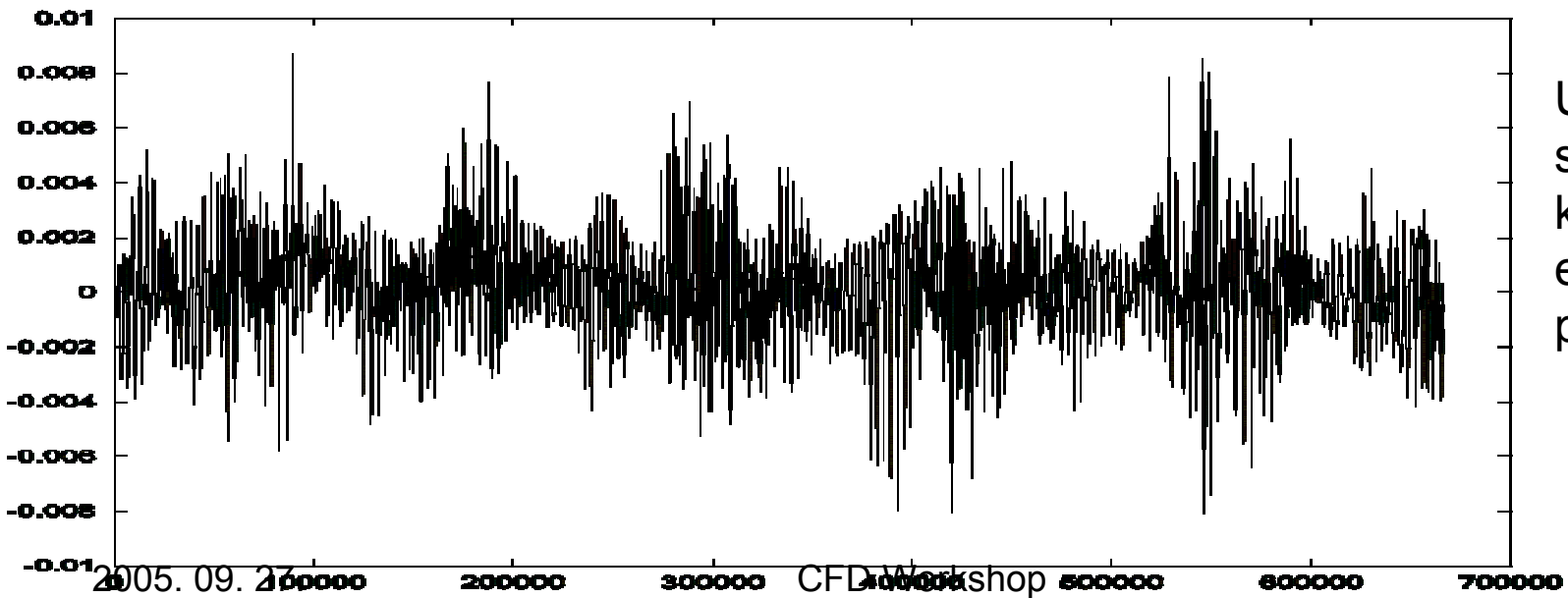
A laterális sebességek vetítése egy
keresztmetszetre



DNS



W, axiális
sebesség
komponens
egy adott
pontban



U, laterális
sebesség
komponens
egy adott
pontban

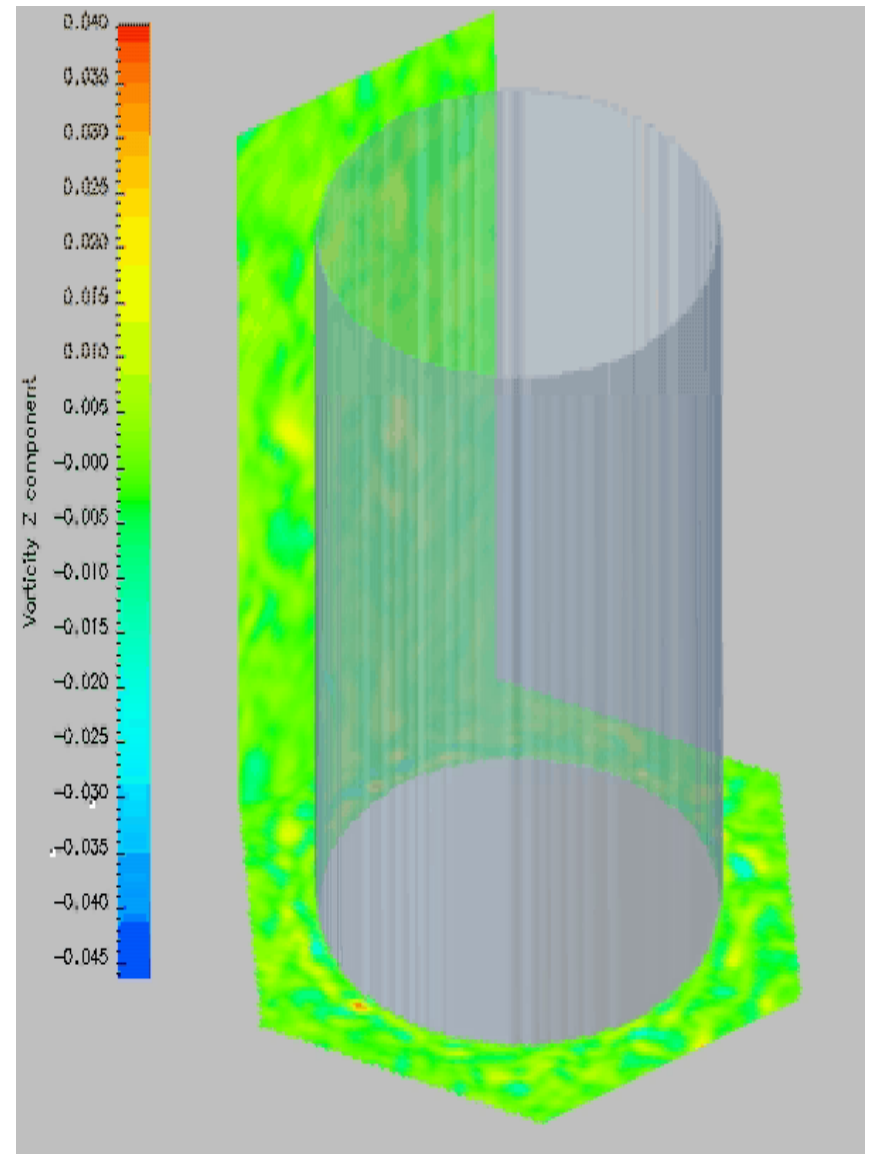
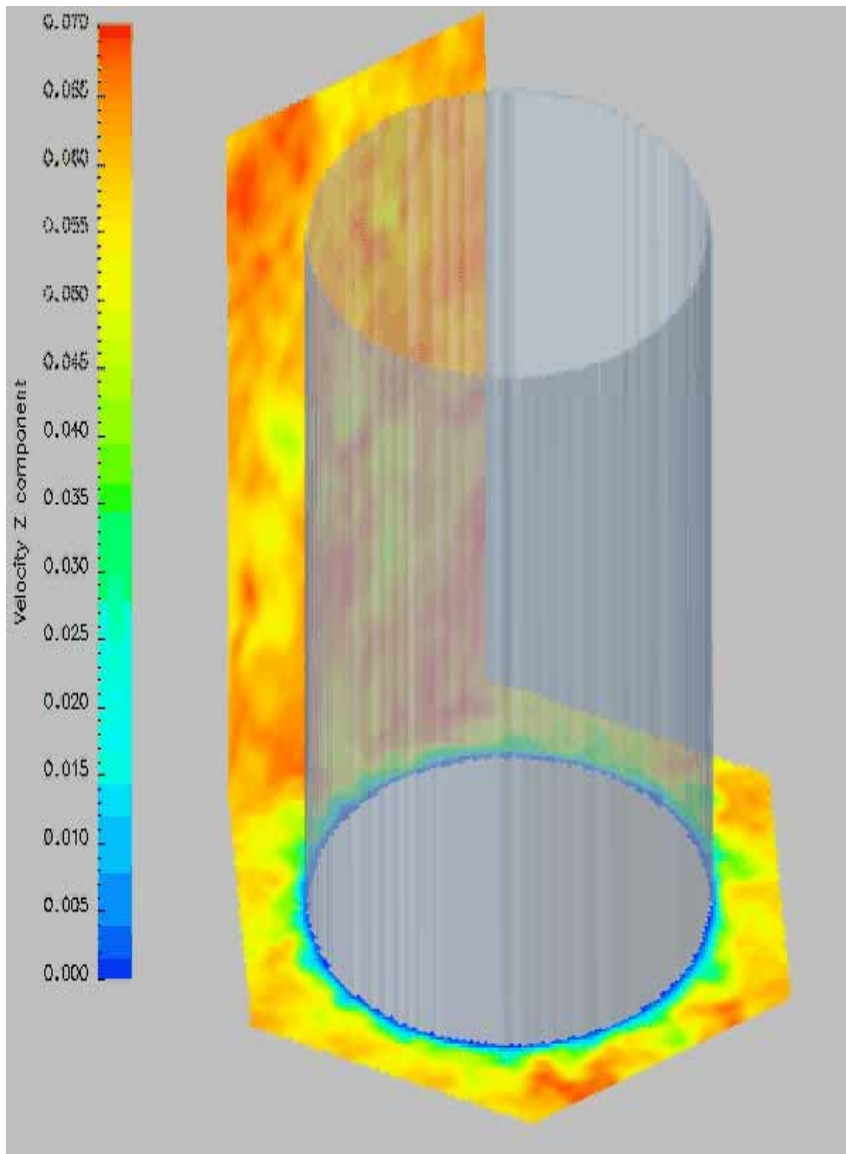
DNS szimuláció eredményei

- Áramlási pulzáció megfigyelhető
- A másodlagos áramlás megfigyelhető az időben átlagolt laterális sebességekben, de nem kaptuk vissza a várt szimmetriát
 - Alacsony Re szám
 - Az átlagolás (vagy a csatorna hossza) nem elég hosszú
- Úgy tűnik, hogy a másodlagos áramlás a fluktuáló örvényleválások következménye (a leválási pontok nem mozognak a keresztmetszetben hosszabb ideig)

Nagy örvény szimuláció

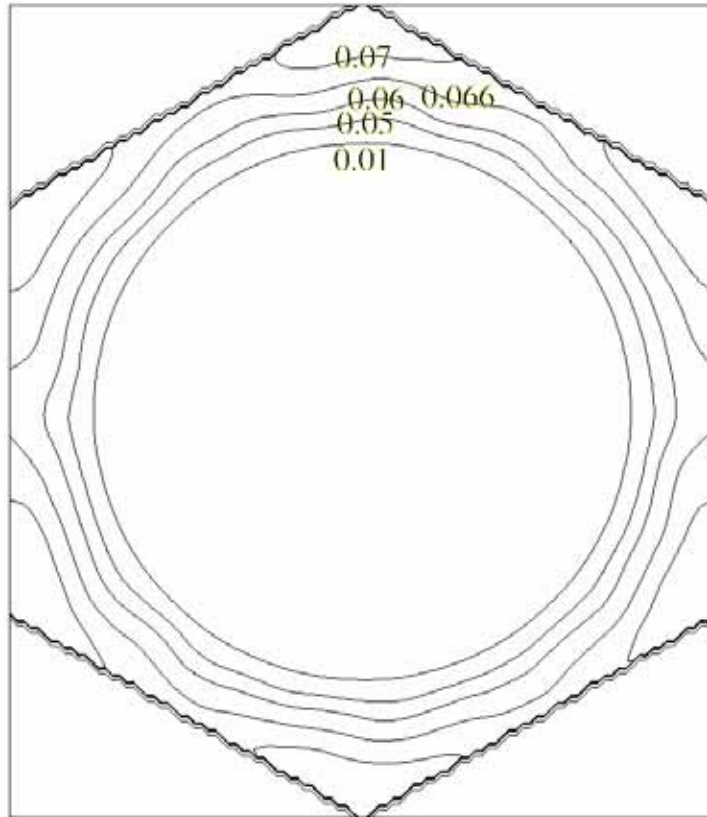
- Nagy Reynolds számú áramlások is modellezhetőek
- A kis skálákat univerzalitásuk miatt egyszerű modellel modellezhetjük
 - Smagorinsky modell

LES

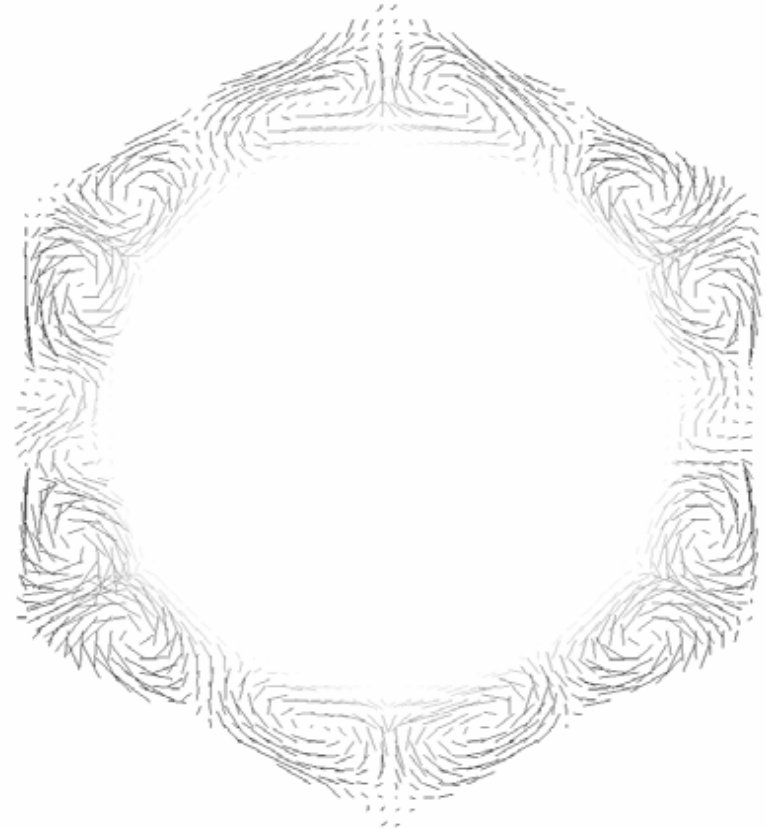


LES

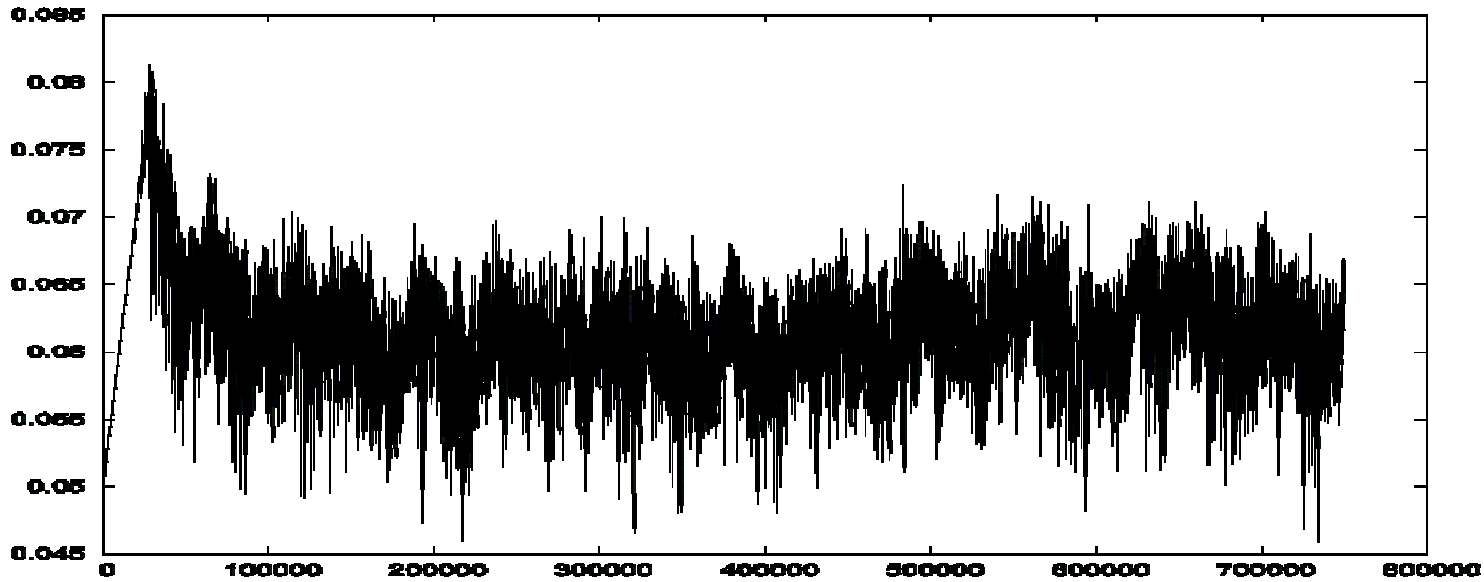
Az axiális átlagsebesség
kontúrja



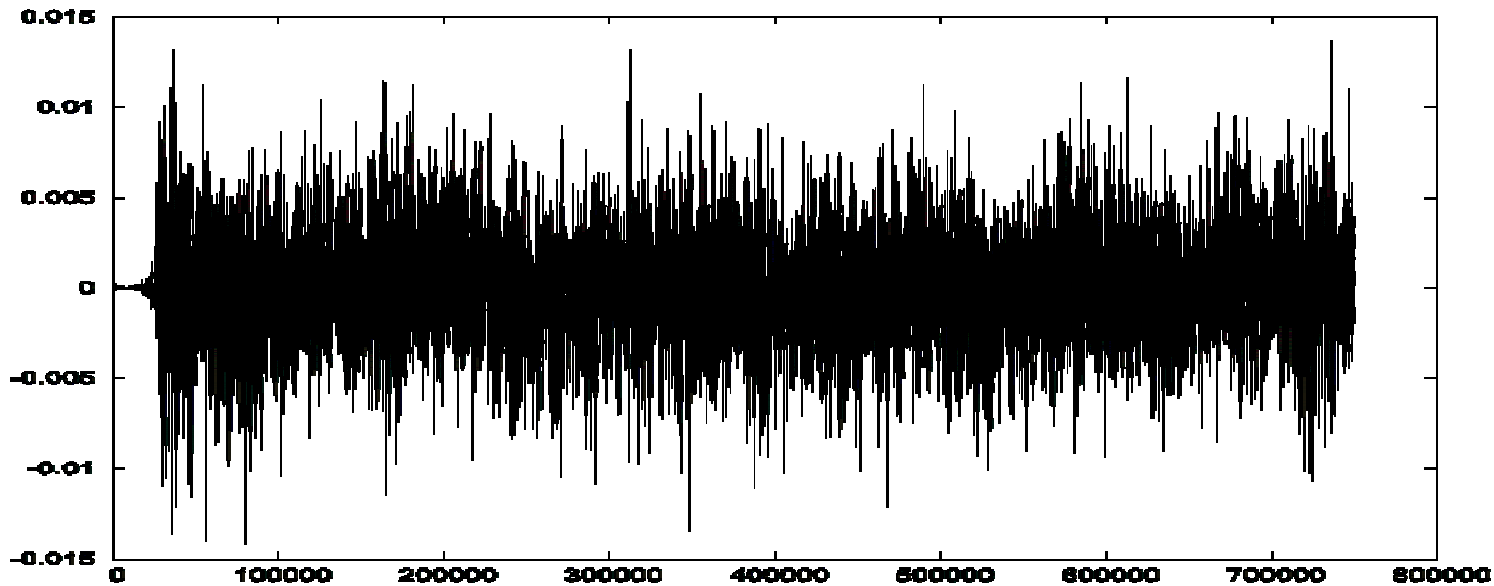
A laterális sebességek vetítése egy
keresztmetszetre



LES



W , axiális
sebesség
komponens
egy adott
pontban



U , laterális
sebesség
komponens
egy adott
pontban

A nagy örvény szimuláció eredményei

- A kialakult struktúrák a nagyobb Re szám miatt jóval kisebbek, mind a DNS szimuláció során.
- A másodlagos áramlás kimutatható és visszaadja a várt szimmetriát

Kereskedelmi CFD kódok használata

- A Reynolds feszültség transzport modell (RST) képes leírni a másodlagos áramlást. A k-epszilon modell nem írja le (Házi G., Annals of Nucl. Energy, 2005).
- Az RST modellel végzett előzetes eredmények Re szám függőséget mutatnak.

Összefoglalva

- Sajátfejlesztésű kóddal
 - DNS és LES szimuláció háromszög elrendezésű csőkötegre
- Mind a DNS mind a LES szimuláció kimutatta a másodlagos áramlást és az áramlási pulzációt
- A szimulációs eredmények erős Re szám függőséget mutatnak (szuperkritikus reaktorokban a Re szám viszonylag alacsony)
- Részletes összehasonlítás szükséges a mérési adatok és a szimuláció eredményei között

További tervek az AEKI-ben

- PIV mérések elvégzése az AEKI-ben csőkötegre
- A szimulációk kétfázisú és termodinamikai kiterjesztése