



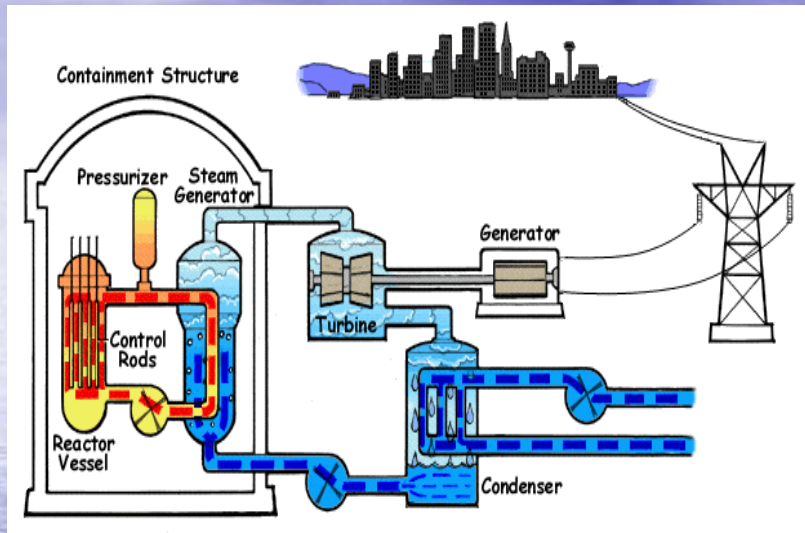
Kétfázisú áramlások modellezése

Dr. Házi Gábor

Amiről szó lesz ...

- A nukleáris ipar és az AEKI motivációja
- Kétfázisú közegek leírása
 - Euler-Euler leírás
 - származtatás,
 - interfésztranszfer modellek,
 - numerikus problémák
 - Euler-Lagrange leírás
 - interfészkövető módszerek,
 - diffúzívinterfész módszerek,
- Turbulencia
- Konklúzió

Motiváció



- RETINA – saját fejlesztés a paksi teljes léptékű szimulátorhoz
- 90-es évek vége - OECD felhívás: csökkentsük az empiricizmust – háromdimenziós számításokra van szükség → RETINA3D

- TMI baleset (1979 március 28)

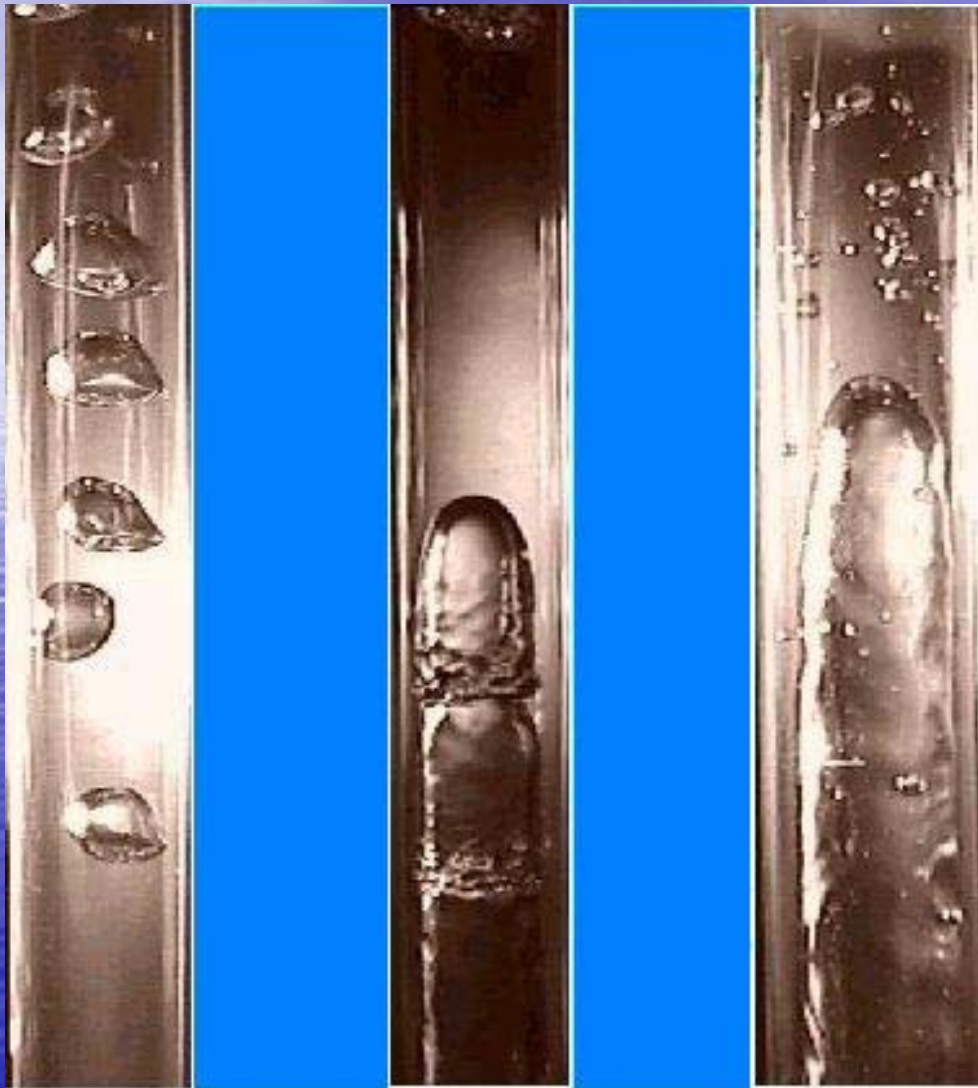


- Nukleáris reaktorok tervezési baleseteinek analízise (primerköri csőtörések – Loss Of Coolant Accident – LOCA)
- “Best estimate” kódok + konzervatív paraméterek
- 2005 NURESIM (EU projekt) – kétfázisú áramlások vizsgálata különböző skálákon (molekuláris dinamikától – Reynolds átlagolt megközelítésig)

Kétfázisú közegek leírása

- Determinisztikus nézőpont (PDE)
 - Euler-Euler leírás (gyakorlati problémák)
 - Euler-Lagrange leírás (diszperz áramlások, javarészt kutatás)
- Sztochasztikus nézőpont (SDE)

Euler-Euler leírás



- Fázisátlagolás
 - Lokális megmaradási egyenletek
 - Fázisindikátor-függvénnyel beszorozni
 - Átlagolás (tér, idő, sokaság, kondicionált stb.)
 - Matematikai nehézség: szakadások az interfésznél → disztribúciókkal kell dolgozni
- Turbulencia átlagolás – szükség van erre?
- Lényeg: elveszítjük a fázisok térszerinti eloszlásával kapcsolatos információt → ezt a rést be kell tölteni!

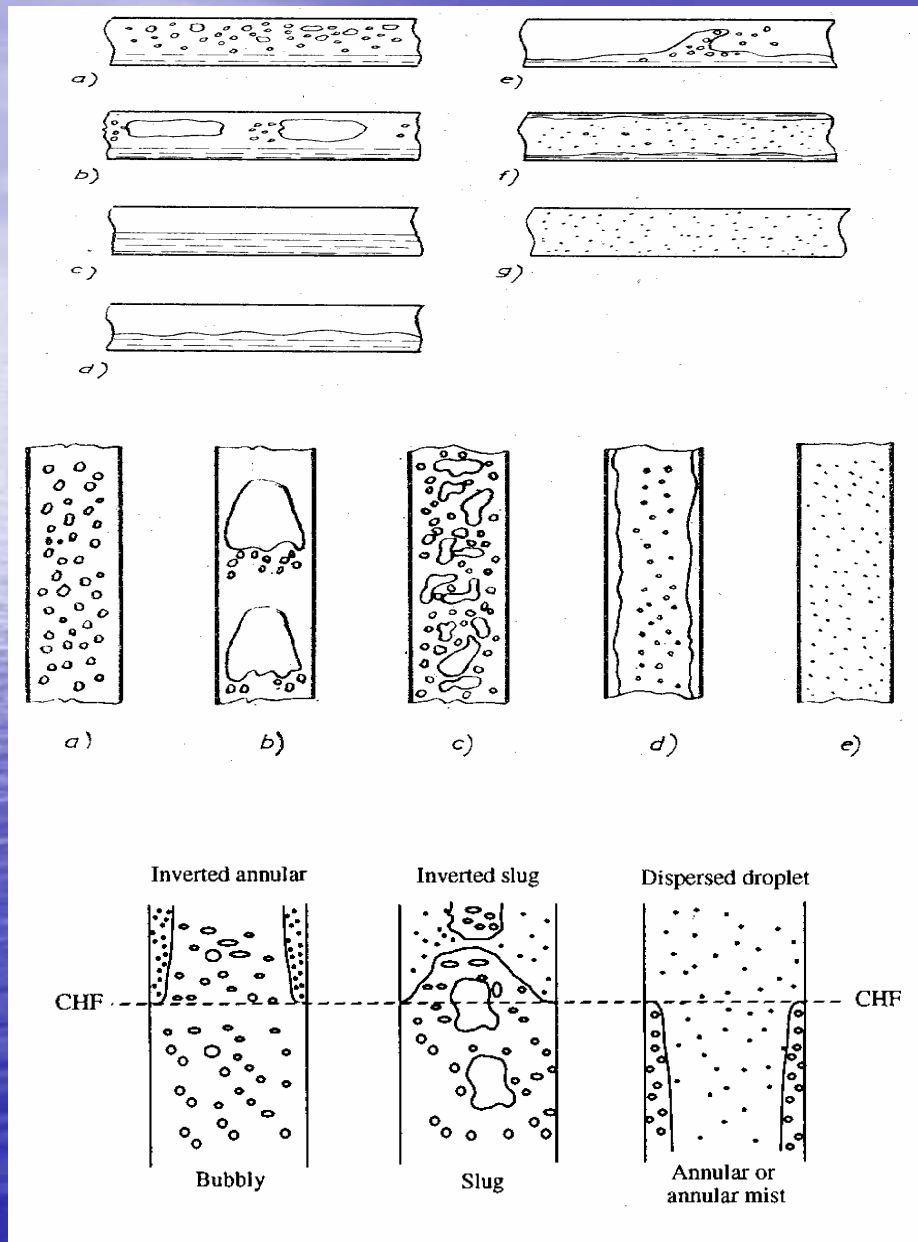
Euler-Euler egyenletek

$$\partial_t(\alpha_k \rho_k) + \partial_x(\alpha_k \rho_k v_k) = \Gamma_{ik}$$

$$\partial_t(\alpha_k \rho_k v_k) + \partial_x(\alpha_k \rho_k v_k^2) + \partial_x(\alpha_k p_k) + (p_k - p_i) \partial_x \alpha_k = \Gamma_{ik} (v_{ik} - v_k) - \tau_{wk} - \tau_{ik}$$

- túl sok ismeretlen: 2x(sebesség, nyomás, energia) + gáztérfogattört
- még egy transzportegyenlet (pl. interfészfelület-transzport)
- vagy egyszerűsítések pl. 1 nyomás
 - sebesség különbség korreláció (slip)
 - mechanikai egyensúly
 - mechanikai + termodinamikai egyensúly (homogén egyensúlyi modell)
- Az egyenletek megválasztása problémafüggő!

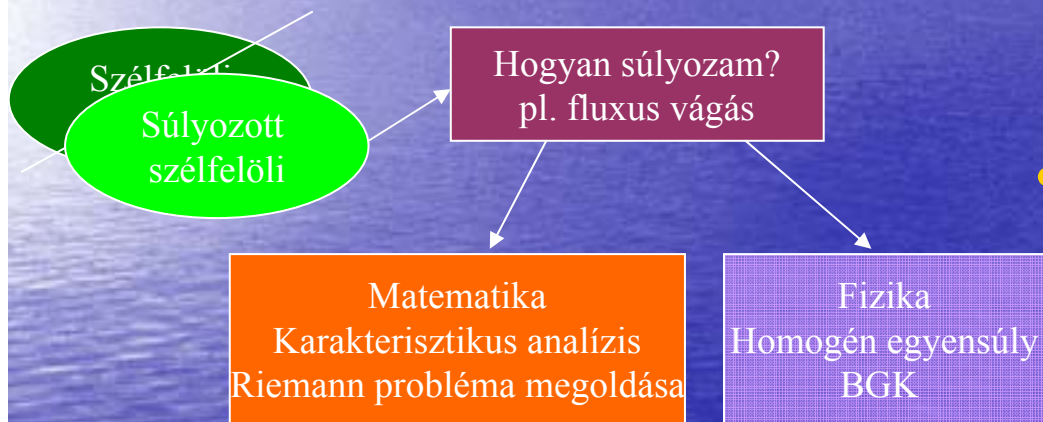
Csatolási összefüggések



- Interfész tömeg-, impulzus- és energiatranszfer (pl. kondenzáció, drag stb.)
- Kényszer: konzisztencia feltételek (jump conditions) → ami az egyik fázisból kimegy az a másikba be
- Homogén egyensúlyi modellnél nem kellene csatolási összefüggések
- Áramlási tartománytól függenek
- Szükség van áramlási térképre
- A modellek paramétereit sok esetben nem mérhetők egymástól függetlenül
- Euler-Lagrange szimuláció segíthet

Numerikus problémák

$$F_B \rightarrow \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} \rightarrow F_A$$



- Nem-konzervatív tagok jelennek meg az átlagolás után
- Az 1P2V egyenlet nem hiperbolikus \rightarrow “virtuális tömeggel” orvosolható de az állóvíz problémánál még mindig problémák lehetnek
- Merev egyenletrendszer \rightarrow gyengén implicit (CFL interfészfrontra megsérthető), erősen implicit sémák (CFL nyomáshullámra megsérthető)
- Fázis eltűnés alulhatározott rendszerhez vezet \rightarrow limiterek, vízszint detektálás stb. alkalmazása újabb problémákat eredményez
- és még sokan mások ☹ ...

Euler-Lagrange leírás

- Ponthoz tartozó részecskék vagy a felület felbontott
- Szinguláris-interfész módszerek
 - interfész-követő módszerek (level-set, volume-of-fluid stb.)
 - impulzus egyenlet + felületi erők modellezése (Laplace törvény)
 - bizonyosan helytelen leírás, ahol az interfész szélessége szerepet kap a dinamikában (pl. kritikus pont környékén)
- Diffúzió-interfész módszerek
 - Cahn-Hilliard elmélet, eredménye speciális alakú feszültségtenzor
 - adott termodinamikai körülmények között (állapotegyenlet) diffúziós folyamatok indulnak meg kialakítva az interfészt
 - nincs szükség az interfész követésére
 - a szinguláris interfész módszer származtatható belőle
- Mindkét megközelítés alkalmas a részecskékre ható erők és az indukált áramlás tanulmányozására
- Alapvető problémák: minden ami DNS-nél +
- Numerikus problémák: gyanús áramok az interfésznél, nagy sűrűségkülönbség kezelése (kezelhető probléma, de drága)
- Komplex problémák: termohidraulika nehezen kezelhető

Turbulencia

- Egyfázisú rendszerekben is rendkívül korlátozottak az ismereteink.

Rogallo R. és Moin P., Ann. Rev. Fluid Mech., 16, 99, (1984)

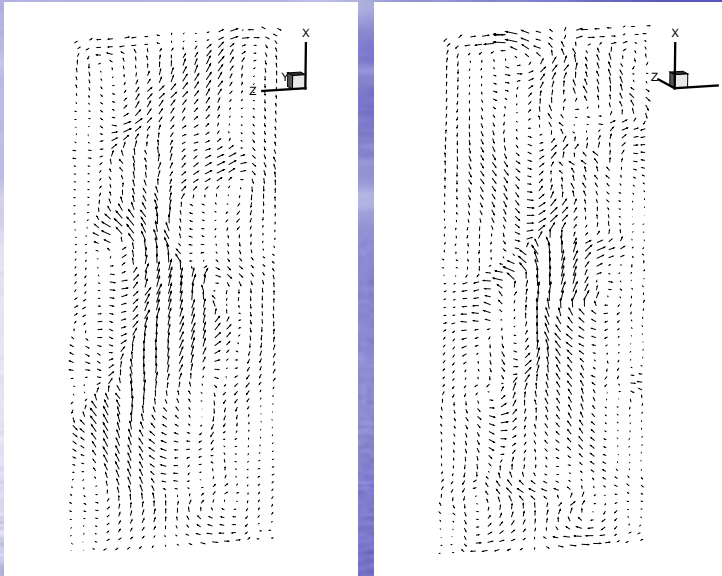
“A faltörvény és Kolmogorov $-5/3$ -os törvénye oly jól megalapozott, hogy bármely kísérleti vagy numerikus eredményt, amely ezeknek ellentmond, fenntartással kell fogadni.”

- A jelenleg használt modellek implicit építenek a skála invarianciára (homogén, izotróp turbulenciát kötelező jól modellezni).
- Kétfázisú rendszerekben a részecskék jelenléte inhomogenitást, viselkedésük pedig anizotrópiát okozhat.
- A részecskék jelenléte tulajdonképpen időfüggő peremfeltételeket hoz a képbe (egyfázisú áramlásban is be kell állítani a modelleket a különböző geometriai konfigurációkhoz).
- Az a mérettartomány ahol univerzalitás várható, erősen behatárolt, ráadásul térben időről, időre változik.

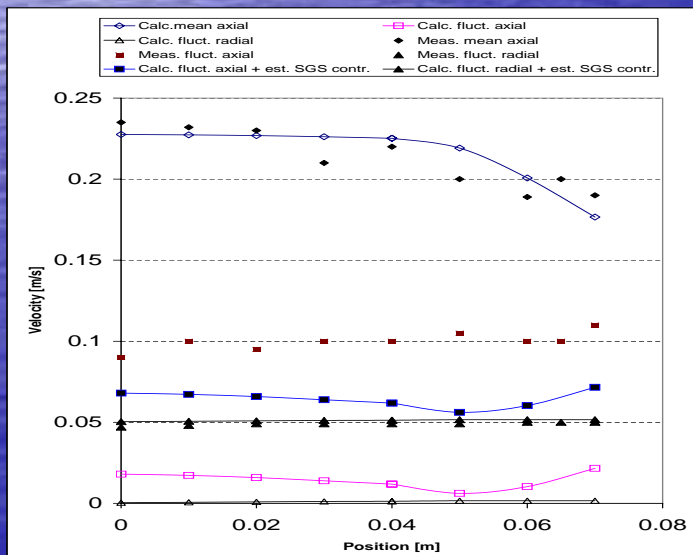
Pszeudoturbulencia

- Bizonyos mérések adott mérettartományban skála invarianciát "suggalnak". A kinetikus energia spektruma $k^{-5/3}$ és $k^{-8/3}$ között mozog (fluktuál).
- van Wijngaarden, 1998 → pszeudoturbulencia (alapvető feltevés, hogy a turbulencia intenzitás nő, nincs kölcsönhatás a buborékok között)
- Kísérleti eredmények bizonyítják, hogy bizonyos esetekben az intenzitás csökken (veszteség csökkenés falak mellett buborékok bejuttatásával).
- A mérési eredmények nem ellentmondásosak, hanem csupán jelzik, hogy a probléma jóval komplexebb mint egyfázisú áramlások esetén.
- Numerikus szimuláció segíthet, hogy a folyamatokat mélyebben megértsük.

Turbulens kétfázisú áramlások szimulációja



- RANS (számos szimuláció a k egyenlet ad-hoc "megspékelésével", diszperziós modellek alkalmazásával)
- LES (csupán néhány ilyen jellegű számítás, a kapott eredmények pontossága messze elmarad az egyfázisú áramlásoknál elérhető pontosságtól)
- Buborékoszlopok szimulációja
 - Sokolichin – "Euler-Euler és Euler-Lagrange megközelítés gyakorlatilag ugyanazt az eredményt adja" – nem jelenti azt, hogy pontos eredményt!
 - LES keretben nagyon leegyszerűsített modellel is reprodukálni tudtuk az áramlás alapvető tulajdonságait (cirkulációs cellák, oszcilláló oszlop)
 - a kvantitatív összehasonlítás gyenge egyezést mutatott
 - PDF transzport egyenlet a buborékátmérőre segít valamelyest



Konklúzió

- A modellezés minden szintjén van tennivaló.



- Einstein adaptáció: A kétfázisú áramlásokat is meg kell próbálni a lehető legegyszerűbb módon leírni, de nem egyszerűbben.