

Többfázisú áramlás modellezése

Dr. Kristóf Gergely
2010. november 1.

Áramlási formák

Meghatározások

- A fázis az áramló közeg egy része, amely határozott felület mentén elkülönül és sajátos dinamikai tulajdonságokkal rendelkezik. Egy fázis lehet szilárd, cseppfolyós vagy légnemű, azonban több fázis is lehet azonos halmazállapotban, pl. különböző méretű szemcsék esetében.
- A többfázisú áramlásban egyszerre jelen lehetnek:
 - Eltérő halmazállapotú fázisok;
 - Azonos halmazállapotú, de eltérő fizikai vagy kémiai tulajdonságokkal rendelkező fázisok (pl. olaj-víz).
- Ezzel szemben, a többkomponensű (multispecies) áramlások esetében: a komponensek molekuláris szinten keverednek egymással és leírásukra azonos sebességet, hőmérsékletet alkalmazunk.

Áramlási formák függőleges gáz-folyadék áramlásban

Többfázisú áramlások típusai

- Gáz-folyadék áramlás
 - Buborékos áramlás
 - Cseppes áramlás
- Gázáramlás szilárd szemcsékkel
 - Pneumatikus szállítás
 - Fluid ágyak
- Zagyok
 - Szén és érc szállítás
 - Iszap áramlás
- Elkülönülő fázisok áramlása (nyílt felszíni áramlások)

Minden típusnak sajátos különféle áramlási formái lehetnek

Többfázisú modellek FLUENT-ben

- Volume of Fluid model (VOF)**
 - Elkülönült áramlási formák elemzésére alkalmas, amikor a felszín pontos alakja a kérdés.
- Mixture Model**
 - Lokálisan homogén áramlást feltételez amelyet a fázisarányokkal, mint mezőváltozókkal írunk le.
 - A keverék összetett mozgásegyenletét oldjuk meg átlagolt anyagjellemzők figyelembevételével továbbá a fázisok közötti viszonylag kis elcsúszási sebességre vonatkozó mozgásegyenletet.
- Eulerian Model**
 - Az Eulerian (és Granular) modellekben alkalmazott megközelítés szerint minden fázis elkülönült, de egymással elkeveredett formában van jelen.
 - Minden fázis mozgását különálló mozgásegyenlettel írja le, a fázisok közötti kölcsönhatás a mozgásegyenletekben megjelenő fázis-csatoló tagokkal vehető figyelembe.
- Lagrangian Dispersed Phase Model (DPM)**
 - DPM modell esetében a szemcsékhez pillanatnyi helyzetet és sebességet határoznak meg.
 - Ha minden szemcse egyedi követése nem lehetséges, „szemcsecsomagokat” képezhetünk, melyben a közvetett szemcse nagyszámú hasonló tulajdonságú szemcsét reprezentál.
 - A DPM a folytonos fázissal kétirányú kapcsolatban állhat, sűrű áramlásban a szemcsék közötti ütközések figyelembe vehetők.

A VOF modell alkalmazhatósága

- A VOF modell egymással nem keveredő folyadékok modellezésére alkalmas:
 - Két gázkomponens nem modellezhető, mert molekuláris szinten elkeverednek;
 - Folyadék-folyadék áramlás modellezhető, ha a két folyadék nem keveredik (víz-olaj keverék).
- A felületi feszültség és a fali adhézió figyelembe vehető.
- Tipikus problémák:
 - Cseppképződés folyadéksugárból (pl. üzemanyag befecskendezés);
 - Nagy buborékok mozgása folyadékban;
 - Szeperator tartályok;
 - Járművek üzemanyag tartályának lötyögése;
 - Gátszakadás;
 - Hajó körüli áramlás (hullámmellenállás);
 - Talajvíz (beszivárgás kutakba).
- A VOF modell nem alkalmazható, ha a határfelszín hossza sokkal kisebb a tartomány méreténél.

Mixture modell

- A mixture modell a többfolyadék (Eulerian) modell egyszerűsített változata. Sok esetben robusztusabb, kisebb a számítási költség és memóriaigény.
- A keverék kontinuitását, mozgásegyenletét és energia egyenletét, továbbá a másodlagos fázisok térfogatkoncentráció egyenletét oldja meg.
- A másodlagos fázisok relatív sebességét algebrai összefüggés alapján számolja. Feltételezi, hogy a relatív sebesség „azonnal” beáll és jóval kisebb mint a keverék sebessége.
- Egységes turbulencia jellemzőket feltételez.
- Kavitációs modell és granulátum-ágy modell alkalmazható.

A VOF modell paraméterei

Az explicit séma éles felszínt ad, azonban a Courant szám < 1 (kb. 0.25):

Implicit séma stacionárius módban is tud futni:

Bekapcsolni

$dt * v / dx$

A relatív sebesség számítása

$$\vec{v}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{\rho_p - \rho_m}{\rho_p} \vec{a} + \text{egy tag turbulens áramlás esetén}$$

(Helyette saját képlet is megadható UDF-ben.)

\vec{a} : a másodlagos fázisra ható térerő (az elsődleges fázis koordinátarendszerében)

$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18 \mu_q}$: a szemcsék relaxációs ideje

f_{drag} : a szemcsék ellenállás tényezője. Több modell választható, az alapértelmezett modell a Shiller-Naumann modell:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re^{0.687} & Re > 1000 \end{cases}$$

Alkalmazási példák

Áramlás vízszintes olajkút környezetében

Hullámok fürdőmedencében

Üstmetallurgia: acél felszíne

Szállított felület

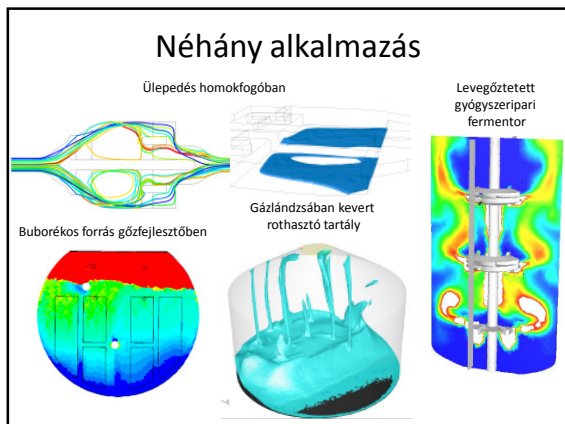
Acélkiválasztó felület

A Mixture modell paraméterei

Bekapcsolni

Peremfeltételek fázisonként és keverékre

A Phases menüben:



Θ granuláris hőmérséklet

- A szemcsék a véletlenszerű mozgásokban energiát tárolnak, amelyet Θ granuláris hőmérséklettel fejezhetünk ki.
- A szilárd fázis nyomása és viszkozitása és diffúziója a Θ-tól függ.
- Θ-t növeli a szilárd fázis deformációja, csökkenti a rugalmatlan ütközések és a sűrűdés a folytonos fázissal.
- Transzportegyenletből, (vagy sűrű granulátum ágyak esetén) algebrai összefüggésből számolják ki a granuláris modellt.

Többfolyadék modell (Eulerian)

- Egy folytonos elsődleges fázisban elkeveredő diszperz fázis (pl. szemcsék, buborékok, cseppek) modellezésére alkalmas.
- Lehetővé teszi a fázisok elkeveredését és szeparálódását is.
- Minden fázisra külön-külön megoldja a mozgásegyenletet, kontinuitást és energiaegyenletet, emellett követi a fázisarány változását. Minden megmaradási tételben összekapcsolhatók egymással a fázisok (inter-phase interaction terms).
- Egységes nyomást feltételez, emellett a Granulár modell esetében a szilárd szemcsék közötti erők figyelembe vehetők.
- Figyelembe vehető a fázisok közötti ellenállás, látszólagos tömeg (buborékok esetén), és a szemcsékre ható felhajtóerő (erősen nyíró áramlásban).
- Minden fázisra külön számolhatók a turbulens jellemzők.
- Homogén reakciók és heterogén reakciók (pl. szemcsék égése) modellezésére használható.

Nedves gőz modell

- A térfogati kondenzáció kezdeti stádiumát írja le Eulerian modellben.
- Fő alkalmazási területe: gőzturbinák és (egyéb erőművi alkatrészek) csepperóziójának elemzése.
- Feltételezi, hogy a gőz fázis tömegaránya viszonylag kicsi (<0.2), a cseppek az áramlással együtt mozognak, és nincsen közöttük közvetlen kölcsönhatás.
- Transzportegyenletekkel határozza meg a gőz tömegkoncentrációját és a cseppek darabszám-koncentrációját.
- Beépített reális gáz modell és széles tartományban érvényes függvények a víz anyagjellemzőire.
- Csak sűrűség alapú megoldóval működik.

Granuláris modellek

Elastikus állapot	Plasztikus állapot	Viszkózus állapot
Stagnáló üledék	Lassú áramlás	Gyors áramlás
A feszültség a deformációtól függ	A feszültség a deformációtól független	Feszültség a deformáció-sebességtől függ

Ezeket a mozgásformákat lehet **Mixture vagy Eulerian modellel** leírni a szemcsék közötti ütközési és súrlódási erők figyelembevételével.

Kavitációs modell

Nyomásváltozás okozta gőzképződés és kondenzáció kis gőztartalom mellett. Vízutrinák és szivattyúk kavitációs jellemzőinek meghatározására.

A gőzfázis kontinuitási egyenlete: Gőzfázis képződési rátája (kg/m³·s).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha \rho_v \mathbf{v}_v) = \pm \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{\left(\frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{3}{4\pi n} \right)^{\frac{1}{3}}} \sqrt{\frac{2 \pm (p_v - p)}{\rho_l}}$$

α: a gőz térfogatkoncentrációja;
 ρ_v: gőz sűrűsége;
 v_v: gőzfázis sebessége;
 ρ_l: víz sűrűsége;
 n: buborékok térfogatkoncentrációja;
 p_v: telített gőznyomás (hőfok függvénye);
 p: keverék nyomása.

Buboréknövekedés sebessége

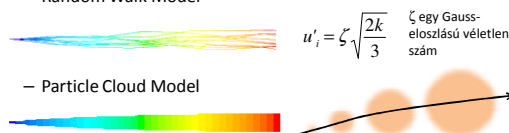
FLUENT rendszerben a kavitációs modell **Mixture modellel** és **Eulerian modellel** használható, három különböző modellváltozat áll rendelkezésre.

Diszkrét fázis modell (DPM)

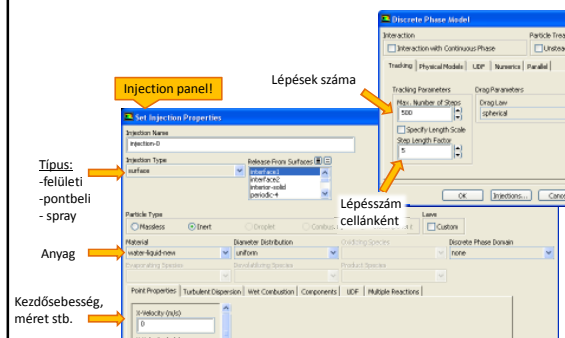
- Részecskék mozgásának trajektóriáit határozza meg a folytonos fázisban.
- Alkalmazható a folytonos közegben diszpergált szemcsék cseppek modellezésére.
- Néhány jellemző ipari alkalmazása: üzemanyag befecskendezés, szárítás, ciklonok, szénpor tüzelés, hígáramú pneumatikus szállítás.
- Stacionárius és instacionárius áramlásban is alkalmazható.
- A diszperz és folytonos fázis közötti tömeg, impulzus és hőátadás figyelembe vehető.
- A Dens DPM modell kivételével:
 - Nem veszi figyelembe a szemcsék közötti kölcsönhatásokat;
 - A diszperz fázis alacsony (<10%) térfogat-koncentrációban van jelen, azonban a tömegkoncentráció nagy is lehet;
 - Feltételezi, hogy a részecskék áthaladnak a tartományon (nem hosszan tartózkodnak, mint pl. szuszpenzió vagy ülepedés esetében).

A turbulencia hatása

- A részecskék „próbálják” követni a turbulens sebesség-ingadozást.
- Ez a hatás a diszkrét fázis szóródásához vezet.
- Két megközelítés alkalmazható:
 - Random Walk Model
 - Particle Cloud Model



A diszkrét fázis modell paraméterei



A DPM modell fali peremfeltételei

- Escape – A részecske elhagyja a számítási tartományt.
 - Trap – Letapad a falon.
 - Reflect – Visszapattan a falról részben rugalmasan.
 - Wall Jet – A szemcsék a fal mentén csúsznak. (Nics jelentős filmképződés).
 - Wall Film – Leírja a jelentős vastagságú fali film mozgását is (pl. benzín befecskendezés vagy esővíz egy jármű felületén).
- Megjegyzés: szemcse erózióra is vannak modellek.

A szemcse mozgás alapegyenlete

$$\frac{d\vec{v}_p}{dt} = F_D (\vec{v} - \vec{v}_p) + \vec{g} \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} + F_{other}$$

Eellenállás
Gravitációs erő

További erők:

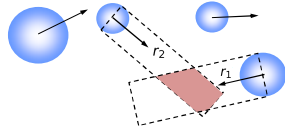
- Tehetetlenségi erő forgó koordináta-rendszerben;
- Termoforézis (Termophoretic force) a hőmérséklet gradienssel ellentétes irányban;
- Brown erő: gázmolekulák okozta véletlen lökdösés, sub-micron méretű szemcsékre vehető figyelembe, lamináris áramlásban (ha az energia egyenlet aktív).
- Turbulens lökdösés;
- A nyíró áramlás okozta felhajtóerő (Saffman's lift force);
- Felhasználó által definiált további erők.

Spray modellezés

- Elsődleges break-up:** a fúvókából kilépő sugár nagyobb cseppekre bomlik. Ezt befolyásolja a fúvóka méretei, kilépő sebesség és turbulencia profilla is. A fúvóka fizikai paraméterei alapján a cseppméretet, a befecskendezési szöveget és a befecskendezés időpontját véletlenszerűen változtatja. Az **Injections menüben** 5 különböző spray modell választható (Atomizer models).
- Másodlagos break-up:** A nagyobb cseppek a relatív légáramlás miatt kisebb cseppekre bomlanak. Utód folyadékcsomagok (Child parcels) indulnak el a nagy csepp környezetéből. A **Discrete Phase menüben** választhatók ki.
 - Taylor Analogy Break-up (TAB) model: rúgó-tömeg-csillapító (felületi feszültség-tömeg-viszkózitás). Viszonylag kis Weber-szám ($We < 100$) esetén alkalmazható.
 - Wave model: a nagy cseppek felületén a légellenállás hatására hullámok alakulnak ki, amelyek felerősödnek és ez vezet a csepp széteséséhez. A keletkezett cseppek mérete a leggyorsabban erősödő hullámhossz alapján határozható meg.

Cseppek ütközése, összetapadása

- Egy szimulációs cellán belül található cseppek összeütközhetnek.
- Ennek valószínűsége a cseppek átmérőjétől és sebességétől függ.



- Az ütközés valószínűsége az ütközési térfogat és a cella térfogat arányával mérhető.
- Csak összetapadással és visszapattanással végződő ütközéseket vesz figyelembe. (A csepp nem robbanhat több darabra.)

A Dens DPM modell

- A részecskék ütközését és sűrűdését leíró erők számításához a szükséges a szemcsés fázis térfogataránya.
- A modell az Eulerian modellre épül, azonban diszperz fázisokra vonatkozó kontinuitást és mozgásegyenletet nem oldja meg (Eulerian rendszerben), hanem ezek mezőváltozóit a Lagrangian modellből veszi át.
- A szemcsék kölcsönhatásának számításához szükséges granuláris hőmérsékletet a folytonos fázisba interpolált sebesség alapján számolja.
- Nem kell a részecske méret osztályokhoz különféle folytonos fázisokat definiálni, ez a Lagrangian modellel természetes módon megtörténik.

Anyag és energiaátadás DPM modellben (Law 1-10)

Beépített összefüggésekkel vagy UDF-el

- Szemcse fűtése és hűtése (heating and cooling)
- Csepp párolgása (evaporation)
- Csepp forrása (droplet boiling)
- Kigázosodás (devolatilization)
- Felületi égés (surface combustion)
- Többkomponensű szemcsék (multicomponent particle definition)