

Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Simulace proudění v míchací nádrži
CFD Simulation of Flow in Mixing Tank

Student:

Bc. Tomáš Sedláček

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Blejchař, Ph.D.

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Sedláček**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 16 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: Simulace proudění v míchací nádrži
CFD Simulation of Flow in Mixing Tank

Zásady pro vypracování:

1. Vytvořte CFD simulaci procesu míchání granulí močoviny v nádrži. Geometrii vytvořte na základě výkresové dokumentace. CFD model vytvořte v programu Ansys Fluent verze min 14.5. Úlohu řešte jako časově závislou, přičemž na počátku $t=0$ s budou na dně usazené granule močoviny. Následně bude spuštěno vrtulové míchadlo s danými parametry.
2. Pomocí CFD simulace určete za jak dlouho dojde k homogenizaci binární směsi.
3. Výsledky simulací porovnejte s výsledky fyzikálního měření, které bylo realizováno během provozních zkoušek technologie.
4. Následně navrhnete vestavby v nádrži (2 až 3 varianty), které by proces homogenizace urychlily.

Rozsah práce: min. 40 stran textu mimo přílohy.
cca 20 stran grafických příloh.

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) Christopher E. Brennen. - Cambridge : *Fundamentals of multiphase flow*, Cambridge University Press, 2005 - xxi, 345 s. : il. ISBN 0-521-84804-0
- 2) Nikolay I. Kolev.: *Multiphase flow dynamics. 1, Fundamentals.* - 2nd ed., Berlin : Springer, c2005 - xxxv, 753 s. ISBN 3-540-22106-9
- 3) Greg F. Naterer. - Boca Raton : *Heat transfer in single and multiphase systems*, CRC Press, c2003 - 618 s. : il. ISBN 0-8493-1032-6
- 4) Kozubková, M.: *Simulace a modelování hydraulických systémů*, VŠB-TU Ostrava, 2009. Dostupné z: <URL: <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>.
- 5) Bojko, M.: *3D proudění - Ansys Fluent učební test*, VŠB-TU Ostrava, 2012. Dostupné z: <URL: <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>.
- 6) Kozubková, M., Blejchař, T., Bojko, M.: *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti*, VŠB-TU Ostrava, 2011. Dostupné z: <URL: <http://www.338.vsb.cz/studium9.htm>>.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Blejchař, Ph.D.**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě 19.5.2014

..... 

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst.3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které bylo VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženo (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. O vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:.....19.5.2014.....

Bc. Tomáš Sedláček
Vančurova 443/30
Bruntál 792 01

.....
.....
podpis

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Sedláček, T. *Simulace proudění v míchací nádrži: diplomová práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2014, 68 s. Vedoucí práce: Blejchař, T.

Tato diplomová práce se zabývá CFD simulací proudění v míchací nádrži. V teoretické části je uvedena teorie vícefázových modelů a to modelu směsi (Mixture model) a Eulerova modelu. V práci je dále provedena CFD simulace míchání v nádrži pomocí Eulerova modelu, která je porovnána s výsledky fyzikálního měření. V závěru práce jsou navrženy vestavby do míchací nádrže, které by v praxi měly dle výsledků simulací homogenizaci binární směsi urychlit.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

Sedláček, T. *CFD Simulation of Flow in Mixing Tank: Master Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, 2014, 68 p. Thesis head: Blejchař, T.

This master thesis deals with CFD flow simulation in mixing tank. The theoretical section presents the theory of multiphase models describing mixture model and Euler model. The work also contains CFD simulation of mixing in the tank by Euler model, which is compared with the results of physical measurements. In the end of work are proposed extensions to the mixing tank, which should accelerate the homogenization of binary mixture by the results of simulations in practice.

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce Ing. Tomáši Blejchařovi Ph.D. za jeho věnovaný čas při konzultacích, připomínky a v neposlední řadě za cenné rady, které mi při vypracování této práce velice pomohly.

Obsah

1.	Úvod.....	- 13 -
2.	Přenos tepla, hybnosti, hmoty	- 14 -
2.1	K- ϵ model	- 15 -
3.	Vícefázové modely	- 15 -
3.1	Model směsi.....	- 15 -
3.1.1	Rovnice řešené v modelu směsi	- 16 -
3.1.2	Relativní rychlost a rychlost posunu	- 18 -
3.1.3	Vlastnosti granulí	- 20 -
3.1.4	Mezifázová plocha koncentrace	- 22 -
3.2	Eulerův model.....	- 23 -
3.2.1	Rovnice objemového zlomku.....	- 25 -
3.2.2	Zachování energie	- 26 -
3.2.3	Rovnice řešené pomocí ANSYS FLUENT	- 27 -
3.2.4	Tlak pevných látek (granulí)	- 33 -
3.2.5	Radiální distribuční funkce	- 35 -
3.2.6	Limit tvorby shluků v binárních směsích	- 36 -
3.2.7	Smykové napětí granulí.....	- 36 -
4.	Řešení zadané nádrže	- 39 -
4.1	Výpočet výšky a koncentrace granulí v nádrži.....	- 39 -
4.2	Testovací výpočet.....	- 45 -
4.3	Výpočet CFD simulace.....	- 46 -
4.3.1	Výsledky simulace zadané nádrže.....	- 47 -
4.3.2	Výsledky simulace navrhované varianty 1	- 49 -
4.3.3	Výsledky simulace navrhované varianty 2.....	- 52 -
4.3.4	Výsledky simulace navrhované varianty 3.....	- 55 -
4.3.5	Výsledky simulace navrhované varianty 4.....	- 58 -

4.4	Stanovení nejefektivnější vestavby	- 61 -
5.	Závěr	- 64 -
6.	Seznam použité literatury.....	- 66 -
7.	Přílohy.....	- 68 -

Seznam použitých symbolů

Značka	Název veličiny	Jednotka
a	zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
c_g	objemová koncentrace granulí	[1]
c_k	hmotnostní zlomek	[1]
c_p	měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
c_{pg}	měrná tepelná kapacita granulované močoviny	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
c_v	objemová koncentrace vody	[1]
C_D	empirická konstanta	[1]
C_D	součinitel odporu vzduchu	[1]
C_l	vztlakový koeficient	[1]
C_{ls}	empirická konstanta	[1]
C_{2s}	empirická konstanta	[1]
d	průměr	[m]
d_g	průměr granulované močoviny	[m]
d_n	průměr nádrže	[m]
e_{ss}	koeficient navrácení	[1]
E	energie	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
f_{drag}	tahová funkce	[1]
$f_{x,y,z}$	složky vnějších sil	[N]
\vec{F}	složky vnějších hmotnostních sil	[N]
\vec{F}_{lift}	vztlaková síla	[N]
\vec{F}_{vm}	virtuální hmotnostní síla	[N]
g	gravitační zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
g_0	radiální distribuční koeficient	[1]
h_c	výška granulí v nádrži	[m]
h_{csl}	výška granulí v nádrži	[m]
h_k	entalpie	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
I_{2D}	druhý invariant deviačního napět'ového tenzoru	$[\text{Pa}^2]$
k	mezifázový výměnný koeficient	[1]
k	turbulentní kinetická energie	$[\text{m}^2 \text{s}^{-2}]$

Značka	Název veličiny	Jednotka
k_{eff}	efektivní vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
k_t	turbulentní tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
l	délkové měřítko	[m]
m	hmotnost	[kg]
m_g	hmotnost granulované močoviny	[kg]
m_v	hmotnost vody	[kg]
n	počet fází	[1]
n_c	celkový počet granulí	[1]
n_i	počet granulí na obvodu	[1]
n_{is}	počet granulí na obvodu sudé vrstvy	[1]
n_m	otáčky míchadla	$[s^{-1}]$
n_{vsl}	počet granulí v sudé a liché vrstvě	[1]
n_r	počet řad granulí ve vrstvě	[1]
n_v	počet granulí ve vrstvě	[1]
o_i	obvod	[m]
o_{is}	obvod sudé vrstvy	[m]
p	tlak	[Pa]
p_{fr}	tlak třecí	[Pa]
Q	výměna tepla	$[W \cdot m^{-2}]$
r_i	poloměr	[m]
r_{is}	poloměr sudé vrstvy	[m]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
s	vzdálenost mezi zrny	[m]
S_E	přenos energie	$[J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$
t_g	teplota granulované močoviny	$[^{\circ}C]$
t_v	teplota vody	$[^{\circ}C]$
T	čas	[s]
$v_{dr,k}$	rychlost unášení	$[m \cdot s^{-1}]$
$v_{r,s}$	korelace koncové rychlost	$[m \cdot s^{-1}]$
V	objem	$[m^3]$
V_c	celkový objem granulí v nádrži	$[m^3]$
V_g	objem granule	$[m^3]$

Značka	Název veličiny	Jednotka
V_{gv}	objem granulí ve vrstvě	$[m^3]$
V_v	objem vody	$[m^3]$
x_g	počet vrstev granulí	[1]
x_{gst}	počet vrstev granulí	[1]
X_l	koeficient kompozice směsi	[1]
α	teplotní vodivost	$[m^2 s^{-1}]$
α_i	objemový zlomek i-té fáze	[1]
γ_γ	časový poměr	[1]
$\gamma_{\theta s}$	kolizní disipace energie	$[m^2 \cdot s^{-3}]$
η_t	turbulentní viskozita	$[Pa \cdot s]$
θ_s	granulační teplota	[K]
λ	tepelná vodivost	$[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$
λ_s	druhá viskozita pevné látky (granulí)	$[Pa \cdot s]$
μ	dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$
$\mu_{s,col}$	kolizní smyková viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$\mu_{s,kin}$	kinematická smyková viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
$\mu_{s,fr}$	třecí smyková viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
ν	kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
ρ	hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\hat{\rho}$	efektivní hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
ρ_g	hustota granulované močoviny	$[kg \cdot m^{-3}]$
σ_t	Prandtlovo – Schmidtovo číslo	[1]
$\bar{\tau}$	deformační tensor	[Pa]
τ_{fr}	třecí napětí	[Pa]
ϕ_s	výměna energie	$[J \cdot m^{-2}]$
ω	úhlová rychlost	$[rad \cdot s^{-1}]$

1. Úvod

Počítačové simulace dnes zasahují do mnoha oborů a jedním z hlavních je technika, kde se simulují různé stavy a procesy strojů, mechanismů a jiných konstrukčních celků. Tato práce je zaměřena na CFD (Computational Fluid Dynamics) simulaci. CFD simulací se rozumí zkoumání problematiky proudění tekutin a jiné doplňující procesy. Simulace obecně se provádějí z nejrůznějších důvodů, ale ten nejdůležitější důvod je čas a s časem je úzce spjata finanční náročnost. Pokud není k dispozici simulace, tak vývojové cykly obvykle obsahují tyto kroky [2]:

- Vytvoření modelu v CAD systému.
- Vytvoření prototypu.
- Otestování prototypu.
- Vyhodnocení výsledků praktických zkoušek.

Na základě vyhodnocení výsledků z praktických testů se tento postup stále opakuje, dokud se nedosáhne požadovaných výsledků, což je časově náročný cyklus. Proto je v dnešní době výhodné využívat možnosti simulace. Díky simulaci je možné ušetřit náklady, protože simulace se provádí na počítači namísto nákladných praktických zkoušek. Nicméně v praxi se většinou simulace a praktické zkoušky kombinují [3].

Proudění může mít vliv na mnoho parametrů například hluk, tlakové ztráty, opotřebením apod. Tyto nežádoucí jevy je snahou co nejvíce eliminovat, respektive identifikovat kritické místa a následně je eliminovat. CFD simulace umožňuje poznat charakter proudění a umožňuje učinit opatření, která odstraní nežádoucí vlivy proudění a na druhou stranu maximálně využít vlivy pozitivní [24].

Pohyb tekutiny a její numerická simulace vychází z fyzikálních zákonů:

- Zákon zachování hmoty.
- Zákon zachování energie.
- Zákon zachování hybnosti.

Tato práce se zabývá numerickým modelováním vícefázového modelu v míchací nádrži v software ANSYS Fluent.

2. Přenos tepla, hybnosti, hmoty

Jak již bylo zmíněno v úvodu, tak zákony popisující pohyb tekutiny jsou zachování hybnosti, hmotnosti a energie (tepla). Tyto zákony mohou být doplněny o další skalární veličiny. Zákony jsou vyjádřeny Navier-Stokesovými rovnicemi spolu s rovnicí kontinuity. Zákony popisují jak laminární tak turbulentní režim proudění [1].

Rovnice kontinuity:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

Navier-Stokesovy rovnice:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + f_x \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + f_y \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(ww)}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + f_z \end{aligned} \quad (2.2)$$

Kde u, v, w jsou složky rychlosti, ρ je hustota, $f_{x,y,z}$ jsou složky vnější objemové síly (odstředivé a gravitační), p je tlak, ν je kinematická viskozita.

Rovnice pro přenos tepla:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \alpha \phi \quad (2.3)$$

kde

$$\begin{aligned} \phi &= 2 \left(\left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right) \\ &\quad + \left(\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2.5)$$

α je teplotní vodivost, c_p je měrné teplo, λ je molekulová tepelná vodivost.

2.1 K- ε model

K- ε model je jeden z modelů, které řeší turbulenci. Tento model stanovuje turbulentní viskozitu za pomoci dvou transportních rovnic a využívá Boussinesqovy hypotézy o vírové viskozitě. Rozložení k je dáno transportní rovnicí. Transportní rovnici pro ε lze odvodit z Navier-Stokesových rovnic. Konečný tvar rovnice pro rychlost disipace v k- ε modelu je ve tvaru:

$$\begin{aligned} \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} + \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - C_D \frac{k^{3/2}}{l} \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1s} \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_l} + \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} \right) \frac{\partial \bar{u}_l}{\partial x_j} - C_{2s} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (2.1.1)$$

Kde C_D , C_{2s} , C_{1s} , σ_k jsou empirické konstanty, k je kinetická energie.

3. Vícefázové modely

Vícefázové modely umožňují modelovat fáze v libovolném počtu. Čím více fází, tím více je výpočet časově náročný a taktéž má počet fází vliv na konvergenční chování. Fáze mohou být v různých kombinacích kapalina – kapalina, kapalina – pevná látka, plyn – pevná látka, plyn – kapalina. Software Fluent nabízí možnost výběru ze tří vícefázových modelů. Každý z těchto modelů je vhodný pro jiné aplikace a mají své výhody i nevýhody. V následujících kapitolách budou řešeny dva modely a to model směsi a Eulerův model.

3.1 Model směsi

Jedná se o model, který umožňuje modelování vícefázových toků. Model může být použit pro homogenní vícefázové proudění, kde se fáze pohybují stejnou rychlostí. Dále se tento model používá pro modelování vícefázových toků, kde se jednotlivé fáze pohybují různými rychlostmi a k výpočtu ne-Newtonovské kapaliny.

Umožňuje modelovat fáze (kapaliny nebo částice) pro řešení dynamiky, kontinuity a energie pro směsi. Typickými aplikacemi jsou např. sedimentace a proudění bublin. Model směsi umožňuje vybrat granulární fáze a počítat se všemi jejími vlastnostmi. To platí pro proudění kapalina – pevná látka (granule).

Existují však u tohoto modelu omezení a těmi jsou [4]:

- Je třeba použít řešič založený na tlaku (řešič založený na hustotě není k dispozici).
- Pouze jedna fáze může být definována jako ideální.
- Neumožňuje modelování tuhnutí a tání.
- Model kavitace není kompatibilní s modelem LES (Large Eddy Simulation).
- Nepoužívat relativní formulace v kombinaci s MRF (Moving Reference Frame) a modelem směsi.
- Nepovoluje nevazké proudění.

3.1.1 Rovnice řešené v modelu směsi

Rovnice kontinuity pro model směsi má tvar:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (3.1.1.1)$$

Kde \vec{v}_m je průměrná rychlost.

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (3.1.1.2)$$

ρ_m je hustota směsi.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (3.1.1.3)$$

Kde α_k je objemový zlomek fáze k .

Rovnice hybnosti pro směsi lze získat sečtením jednotlivých rovnic hybnosti pro všechny fáze. To lze vyjádřit jako:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) \\ = -\nabla p + \nabla[\mu_m(\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} \\ + \nabla \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k}) \end{aligned} \quad (3.1.1.4)$$

Kde n je počet fází

\vec{F} jsou složky vnějších hmotnostních sil

μ_m je dynamická viskozita směsi

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (3.1.1.5)$$

$\vec{v}_{dr,k}$ je rychlost unášení druhé fáze k :

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (3.1.1.6)$$

Rovnice energie pro směsi má následující tvar:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\alpha_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (3.1.1.7)$$

Kde k_{eff} je efektivní vodivost $\sum \alpha_k (k_k + k_t)$, k_t je turbulentní tepelná vodivost (definuje se podle použitého turbulentního modelu). První člen na pravé straně rovnice (3.1.1.7) představuje přenos energie v důsledku vedení. Člen S_E zahrnuje jiné objemové tepelné zdroje.

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (3.1.1.8)$$

Výše uvedená rovnice (3.1.1.8) se používá pro stlačitelné fáze. $E_k = h_k$ se používá pro nestlačitelné fáze, kde h_k je entalpie pro fázi k .

3.1.2 Relativní rychlost a rychlost posunu

Relativní rychlost (může být označována také jako rychlost skluzu) je definovaná jako rychlost sekundární fáze p vzhledem k rychlosti primární fáze q :

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (3.1.2.1)$$

Hmotnostní zlomek pro jakoukoliv fázi k je definován vztahem:

$$c_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \quad (3.1.2.2)$$

Rychlost posunu a relativní rychlost ($\vec{v}_{dr,p}$) jsou propojeny výrazem:

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n c_k \vec{v}_{qk} \quad (3.1.2.3)$$

Model směsi využívá algebraické formulace. Základní předpoklad pro algebraický model směsi je předepsání algebraického vztahu pro relativní rychlost a ta je popsána vztahem [5]:

$$\vec{v}_{pq} = \frac{\tau_p}{f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} \vec{a} \quad (3.1.2.4)$$

Kde τ_p je relaxační čas částic.

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (3.1.2.5)$$

Kde d_p je průměr částic (bublínky, kapky, granule) sekundární fáze p , \vec{a} je zrychlení částic sekundární fáze. Tahová funkce f_{drag} je převzata z literatury [6].

Zrychlení \vec{a} se vypočítá ze vztahu:

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_m \cdot \nabla)\vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t} \quad (3.1.2.6)$$

Nejjednodušší algebraická formulace skluzu je tzv. drift flux model, kde je zrychlení částice dáno působením gravitace nebo odstředivé síly a relaxační doba částic je pak upravena tak, aby byla brána v úvahu i přítomnost jiných částic. U turbulentního proudění by relativní rychlost měla obsahovat difúzní výraz v důsledku disperze uvedené v pohybové rovnici pro dispergované fáze. Software ANSYS Fluent zahrnuje disperzi v relativní rychlosti:

$$\vec{v}_{pq} = \frac{(\rho_p - \rho_m)d_p^2}{18\mu_q f_{drag}} \vec{a} - \frac{\eta_t}{\sigma_t} \left(\frac{\nabla \alpha_p}{\alpha_p} - \frac{\nabla \alpha_q}{\alpha_q} \right) \quad (3.1.2.7)$$

Kde σ_t je Prandtlovo / Schmidtovo číslo. η_t je turbulentní vodivost. Turbulentní vodivost se vypočítá ze spojitě disperzní kolísavé rychlosti korelace:

$$\eta_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \left(\frac{\gamma_\gamma}{1 + \gamma_\gamma} \right) (1 + c_\beta \zeta_\gamma^2)^{-1/2} \quad (3.1.2.8)$$

$$\zeta_\gamma = \frac{|\vec{v}_{pq}|}{\sqrt{2/3k}} \quad (3.1.2.9)$$

Kde $C_\beta = 1,8 - 1,35 \cos^2 \theta$

$$\cos \theta = \frac{\vec{v}_{pq} \cdot \vec{v}_p}{|\vec{v}_{pq}| |\vec{v}_p|} \quad (3.1.2.10)$$

γ_γ je časový poměr mezi časovým měřítkem energetických turbulentních vírů ovlivněných účinkem přechodu trajektorie a relaxačním časem částic.

Když se řeší vícefázový model směsi počítaný s rychlostí posunu je možné použít přímo předepsané formulace. K dispozici jsou tyto možnosti:

- Schiller-Naumann
- Mosri-Alexander
- Symetrický
- Konstantní
- Definované uživatelem

Rovnice objemového zlomku pro sekundární fáze

Rovnice objemového zlomku pro sekundární fáze p popsána vztahem:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \quad (3.1.2.11)$$

3.1.3 Vlastnosti granulí

Koncentrace částic je důležitým faktorem pro výpočet efektivní viskozity směsi. Může být použit viskozita granulí pro získání hodnoty viskozity suspenze. Objemově vážený průměr pro viskozitu obsahuje smykovou viskozitu vyplývající z hybnosti částic v důsledku translace a kolize.

Kolizní, kinetické části a volitelé třecí části poskytují pevným látkám (granulím) smykovou viskozitu:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (3.1.3.1)$$

Kolizní část smykové viskozity je popsána vztahem [7], [8]:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\Theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \alpha_s \quad (3.1.3.2)$$

Software ANSYS Fluent poskytuje dvě rovnice pro **kinematickou viskozitu**. Výchozí výraz je [8]:

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s d_s \rho_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss})(3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss}\right] \quad (3.1.3.3)$$

Jako další volitelná rovnice je [7]:

$$\mu_{s,kin} = \frac{10 \rho_s d_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{96 \alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left[1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1 + e_{ss})\right]^2 \alpha_s \quad (3.1.3.4)$$

3.1.3.1 Granulační teplota

Viskozita vyžaduje vyspecifikovat teplotu granulace pro pevnou fázi. Zde je použita algebraická rovnice z teploty granulí transportní rovnice. Toto platí pouze pro husté fluidní vrstvy, kde pojem konvekce a difuze lze zanedbat za předpokladu, že produkce a ztráta granuloové energie je v rovnováze.

$$0 = (-p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s) : \nabla \vec{v}_s - \gamma_{\theta_s} + \phi_{ls} \quad (3.1.3.1.1)$$

Kde $(-p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s) : \nabla \vec{v}_s$ je energie daná napět'ovým tenzorem pevných látek (granulí).

γ_{θ_s} je kolizní disipace energie.

ϕ_{ls} je výměna energie mezi *l-tou* kapalinou nebo pevnou (granulovou) fází a *s-tou* pevnou fází.

Kolizní disipace energie γ_{θ_s} představuje míru energické disipace v rámci *s-té* pevné fáze v důsledku kolizí mezi částicemi. To je popsáno rovnicí [9]:

$$\gamma_{\theta_m} = \frac{12(1 - e_{ss}^2)g_{0,ss}}{d_s\sqrt{\pi}}\rho_s\alpha_s^2\Theta_s^{3/2} \quad (3.1.3.1.2)$$

Přenos kinetické energie náhodných fluktuací v rychlosti částice z pevné fáze do kapaliny nebo do pevné fáze je popsáno rovnicí [7]:

$$\phi_{ls} = -3K_{ls}\Theta_s \quad (3.1.3.1.3)$$

Software ANSYS Fluent umožňuje řešit granulační teplotu těmito možnostmi [4]:

- Algebraická formulace – zanedbání konvekce a difuze v transportní rovnici.
- Konstantní teplota granulí – výhodné pro situace, kde jsou malé náhodné výkyvy.
- UDF (uživatelé nadefinované funkce) granulační teploty.

3.1.4 Mezifázová plocha koncentrace

Mezifázová plocha koncentrace je definována jako mezifázová plocha mezi dvěma fázemi na jednotku objemu směsi. To je důležitý parametr pro odhad hmoty, pohybových a energických přenosů skrze rozhraní mezi fázemi. Ve dvoufázovém systému kapalina – dispergované částice se můžou velice rychle změnit rozměr a distribuci částic prostřednictvím následujících mechanismů:

- Přenosem hmoty (krystalizace, rozpouštění).
- Expanzí vlivem změny tlaku.
- Slučováním (srůstáním) částic.
- Rozpadem částic.
- Mechanismem nukleace.

Model Population Balance ideálně zachycuje tento jev, ale je výpočetně náročný vzhledem k tomu, že několik transportních rovnic se řeší pomocí metody momentů. Model mezifázové plochy koncentrace využívá pouze jednu transportní rovnici. To je specifické pro toky bublin v kapalině.

Touto problematikou se zabývají dva modely [10], [11]:

- Hibiki-Ishii model
- Ishii-Kim model

Dle jejich studie lze mechanismy interakcí rozdělit do několika kategorií:

- Koalescence (srůstání) vlivem náhodné kolize řízené turbulencí.
- Rozbití vlivem turbulentních vírů.
- Tvoření shluku zapříčiněné vybuzením úplavu.

Ishii-Kim model

Tento model je vhodný pouze pro dvoufázový režim proudění, kde jedna fáze je plyn a druhá kapalina. Nicméně lze použít uživatelem nadefinované funkce (UDF) pro zahrnutí vlastních modelů mezifázové koncentrační plochy, které mohou být použity pro jiné režimy proudění.

Yao-Morel model

Objemová mezifázová oblast je důležitá veličina, která se objevuje při výpočtu interfázních výměnných sil jako je hybnost, hmotnost a přenos tepla. V software ANSYS Fluent výše uvedené modely (Hibiki-Ishii, Ishii-Kim) byly implementovány v souvislosti s prouděním bublinek a přenosem hmoty. Existuje rozšíření těchto dvou modelů, které zahrnují různorodé účinky přenosu hmoty na stěnu, tímto problémem zabývali Yao a Morel. Pohybové rovnice objemových mezifázových ploch obsahují nukleační výraz a modely pro koalescenci a rozpad.

3.2 Eulerův model

Eulerův multifázový model umožňuje v software ANSYS Fluent modelování z více samostatných, ale vzájemně se ovlivňujících fází. Jednotlivé fáze mohou být kapaliny, plyny nebo pevné látky v téměř jakékoli kombinaci. Eulerův přístup se používá pro každou fázi na rozdíl od Euler-Lagrangeového přístupu, který se používá pro diskrétní fáze modelu.

Tento vícefázový model má omezený počet sekundárních fází pouze paměti počítače a konvergenčním chováním. Může být vymodelován libovolný počet fází za předpokladu, že je k dispozici dostatek paměti v PC. Pro komplexní vícefázové proudění je možné, že řešení bude omezeno konvergenčním chováním.

Software ANSYS Fluent nerozlišuje u Eulerova vícefázového modelu vícefázové toky (kapalina – kapalina, kapalina – pevná látka). Granulární (pevná látka) tok je ten, který obsahuje alespoň jednu granulární fázi.

Řešení v software ANSYS Fluent je založeno na [4]:

- Jednotném tlaku pro všechny fáze.
- Pohybové rovnice a rovnice kontinuity jsou řešeny pro každou fázi.
- Je k dispozici několik součinitelů odporu pro mezifázové funkce. Součinitele lze upravit uživatelem (UDF).
- Všechny k-epsilon a k-omega turbulentní modely jsou k dispozici a mohou být aplikované do všech fází nebo směsí.
- Pro modelování granulových toků je k dispozici třecí viskozita.

Eulerův vícefázový model má následující omezení [4]:

- Nelze použít Reynoldsův napěťový model.
- Sledování částic (pomocí Lagrangeovy dispergované fáze) interaguje pouze s primární fází.
- Podélné periodické proudění nelze modelovat se specifikovaným hmotnostním průtokem (uživatel může určit tlakovou ztrátu).
- Není povoleno nevazké proudění.
- Není povoleno tání a tuhnutí.
- Při paralelním sledování částic nelze použít model diskrétní fáze s Eulerovým vícefázovým modelem, jestliže je zapnutá možnost sdílené paměti.

Pro změnu jednofázového modelu, kde je zaveden jednotný soubor rovnic pro hybnost, kontinuitu a energii, tak do vícefázového modelu musí být zavedeny další rovnice. Při zavádění dalších souborů rovnic musí být původní soubor rovnic také

změněn. Změny obsahují zavedení objemových zlomků $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ pro více fází stejně jako mechanismy pro výměnu hybnosti, tepla a hmotnosti mezi fázemi.

3.2.1 Rovnice objemového zlomku

Objemový zlomek zahrnuje pojem fázových podílů a je značen jako α_q . Objemové zlomky představují prostor obsazený jednotlivými fázemi a zákony o zachování hmoty a hybnosti jsou splněny pro každou fázi samostatně. Odvození rovnic zachování lze provést pomocí souboru průměrné okamžité místní rovnováhy pro každé fáze [12] nebo pomocí teorie o směsi [13].

Objem fáze q je definován takto:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (3.2.1.1)$$

Kde $\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1$

Efektivní hustota fáze q je definována:

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad (3.2.1.2)$$

Kde ρ_q je fyzická hustota fáze q .

Rovnice objemového zlomku mohou být řešeny buď prostřednictvím implicitní nebo explicitní časovou diskretizací [4].

Vztlaková síla

Pro vícefázové proudění může ANSYS Fluent zahrnovat vliv vztlakových sil na sekundární fázi částic (bublínky, kapičky). Tyto vztlakové síly působí na částici hlavně kvůli gradientům rychlosti v primární fázi. Vztlaková síla má větší význam pro větší částice. Tyto síly není vhodné zavádět pro těsné shluky částic nebo pro velmi malé částice. Vztlaková síla působící na sekundární fázi p v primární fázi q se vypočítá [14]:

$$\vec{F}_{lift} = -c_l \rho_q \alpha_p (\vec{v}_q - \vec{v}_p) (\nabla \cdot \vec{v}_q) \quad (3.2.1.3)$$

Kde C_l je vztlakový koeficient (0,5 pro nevazké proudění).

Ve většině případech není třeba vztlakovou sílu zavádět do výpočtu, protože ve srovnání s tahovou silou je vztlaková síla zanedbatelná. Tato síla má význam pouze pro případy, kdy se fáze oddělí rychle. Nicméně zahrnutí této síly významně ovlivňuje délku výpočtu.

Virtuální hmotnostní síla

U vícefázového proudění ANSYS FLUENT zahrnuje tzv. virtuální hmotnostní účinek, který nastane, když sekundární fáze p zrychluje vzhledem k primární fázi q . Setrvačnost hmoty, se kterou zrychlují částice, vyvíjí tzv. virtuální hmotnostní sílu na částice [14]. Ta je popsána rovnicí:

$$\vec{F}_{vm} = 0,5 \cdot \rho_q \alpha_p \left(\frac{d_q \vec{v}_q}{dt} - \frac{d_p \vec{v}_p}{dt} \right) \quad (3.2.1.4)$$

Výraz $\frac{d_q}{dt}$ udává fázi materiálu ve formě časové derivace.

$$\frac{d_q(\phi)}{dt} = \frac{\partial(\phi)}{\partial t} + (\vec{v}_q \cdot \nabla)\phi \quad (3.2.1.5)$$

Virtuální hmotnostní účinek je významný, pokud hustota sekundární fáze je mnohem menší než hustota primární fáze.

3.2.2 Zachování energie

K popisu zachování energie u Eulerových vícefázových aplikací, může být pro každou fázi psána samostatná rovnice entalpie [4].

Výměna tepla mezi fázemi musí být v souladu s podmínkami lokální rovnováhy $Q_{pq} = -Q_{qp}$ a $Q_{qq} = 0$.

3.2.3 Rovnice řešené pomocí ANSYS FLUENT

To jak řeší software ANSYS Fluent rovnice pro směs kapalina-kapalina a granulární vícefázové proudění je popsáno pro obecný případ n -té fáze proudění.

Objemový zlomek pro každou fázi je počítán z rovnice kontinuity:

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_p \rho_p) \right) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (3.2.3.1)$$

Kde ρ_{rq} je referenční hustota nebo průměrná hustota objemu q -té fáze v řešené oblasti.

Zachování hybnosti pro kapalnou fázi q je:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) \\ = -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} \\ - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) \end{aligned} \quad (3.2.3.2)$$

Kde \vec{F}_q je vnější síla, p je tlak sdílený všemi fázemi, K_{pq} je mezifázový výměnný koeficient hybnosti, \vec{v}_{qp} je mezifázová rychlost, $\bar{\tau}_q$ je deformační tenzor q -té fáze.

3.2.3.1 Pohybové rovnice kapalina-pevná látka

Software ANSYS Fluent používá multi-kapalinový granulární model k popisu chování proudění směsi kapalina-pevná látka. Napětí pevné fáze je odvozeno analogií náhodným pohybem částic vznikající při vzájemných srážkách mezi částicemi a tepelným pohybem v plynu. Intenzita kolísání částic určuje napětí, viskozitu a tlak pevné fáze. Kinetická energie, která je spojená s kolísáním rychlosti je reprezentována

jako tzv. "pseudotermální" nebo granulační teplota, která je úměrná náhodnému pohybu částic.

Výměna hybnosti mezi fázemi je založena na hodnotě výměnného koeficientu kapalina-kapalina K_{pq} a pro granulární proudění na koeficientu kapalina-pevná látka a pevná látka-pevná látka K_{ls} .

3.2.3.2 Výměnný koeficient kapalina-kapalina

Pro proudění kapalina-kapalina se předpokládá, že každá sekundární fáze je tvořena kapičkami nebo bublinami a to má vliv na to, jak přiřadit kapalinu k určité fázi. Například u proudění, kde objemově převládá jedna fáze nad druhou fází, tak by měla být modelována kapalina o větším objemu jako primární fáze, protože je více pravděpodobné, že v ní vzniknou bubliny či kapičky. Výměnný koeficient pro tyto typy fází lze pak napsat v tomto obecném tvaru:

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \rho_p \alpha_p f}{\tau_p} \quad (3.2.3.2.1)$$

Kde f je tahová funkce, která je definovaná odlišně pro různé modely výměnných koeficientů, τ_p je tzv. relaxační čas částic a ten je definován:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (3.2.3.2.2)$$

Kde d_p je průměr částic fáze p .

Téměř všechny definice tahové funkce f obsahují součinitel odporu vzduchu C_D , který je založen na Reynoldsovém čísle. Tahová funkce f je vždy vynásobená objemovým zlomkem primární fáze q .

Pro Schillerův a Naumannův model se tahová funkce vypočítá [6]:

$$f = \frac{C_D Re}{24} \quad (3.2.3.2.3)$$

$$C_D = \frac{24(1 + 0,15Re^{0,687})}{Re} \quad \text{pro } Re \leq 1000 \quad (3.2.3.2.4)$$

$$C_D = 0,44 \quad \text{pro } Re > 1000 \quad (3.2.3.2.5)$$

Re je relativní Reynoldsovo číslo. Reynoldsovo číslo pro primární fázi q a sekundární fázi p se vypočítá z rovnice:

$$Re = \frac{\rho_q |\vec{v}_p - \vec{v}_q| d_p}{\mu_q} \quad (3.2.3.2.6)$$

Relativní Reynoldsovo číslo pro sekundární fáze p a r se vypočítá:

$$Re = \frac{\rho_{rp} |\vec{v}_r - \vec{v}_p| d_{rp}}{\mu_{rp}} \quad (3.2.3.2.7)$$

Kde viskozita směsi fází p a r se vypočte:

$$\mu_{rp} = \alpha_p \mu_p + \alpha_r \mu_r \quad (3.2.3.2.8)$$

Schillerův a Naumannův model je výchozí metoda a je akceptovatelná pro všechny páry fází kapalina-kapalina. Nicméně existuje pro tuto problematiku i další model a to Morsi-Alexander model.

Pro Morsi-Alexanderův model se tahová funkce f vypočítá stejně jako u předchozího modelu, kde součinitel odporu vzduchu C_D se vypočítá dle rovnice [15]:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (3.2.3.2.9)$$

Reynoldsovo číslo se vypočítá stejně jako u předchozího modelu a výraz a je definován v literatuře [4].

Reynoldsovo číslo u modelu Morsi-Alexander je definované ve větším rozsahu než u předešlého modelu, což je výhodou, ale výpočty pomocí toho modelu mohou být méně stabilní.

Pro symetrické modely se viskozita a hustota vypočítá:

$$\rho_{pq} = \alpha_p \rho_p + \alpha_q \rho_q \quad (3.2.3.2.10)$$

$$\mu_{pq} = \alpha_p \mu_p + \alpha_q \mu_q \quad (3.2.3.2.11)$$

Průměr je definován takto:

$$d_{pq} = \frac{1}{2}(d_p + d_q) \quad (3.2.3.2.12)$$

Následně se počítají tyto rovnice:

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \rho_{pq} \alpha_p f}{\tau_{pq}} \quad (3.2.3.2.13)$$

$$\tau_{pq} = \frac{\rho_{pq} (d_{qp})^2}{18 \mu_{pq}} \quad (3.2.3.2.14)$$

$$Re = \frac{\rho_{pq} |\vec{v}_p - \vec{v}_q| d_{pq}}{\mu_{pq}} \quad (3.2.3.2.15)$$

Dále se vypočítá tahová funkce f dle výrazu (3.2.3.2.3) a součinitel odporu vzduchu C_D dle výrazů (3.2.3.2.4), (3.2.3.2.5).

Symetrický model je vhodný pro proudění, ve kterých sekundární fáze (dispergovaná) v jedné oblasti se stane primární (kontinuální) fází. Pro jednu dispergovanou fázi platí:

$$d_p = d_q \quad (3.2.3.2.16)$$

$$\frac{(d_p + d_q)}{2} = d_p \quad (3.2.3.2.17)$$

Například, když je vzduch vstřikován do spodní části nádoby, která je naplněná do půlky vodou, tak vzduch je dispergovaná fáze v dolní polovině nádoby a v horní polovině nádoby je již vzduch spojitá fáze. Tento model může být také použit pro interakci mezi sekundárními fázemi.

Je možné také určit výměnné koeficienty pro dvojice fází. Také je možné zadat uživatelem definované funkce pro nadefinování výměnných koeficientů. Pokud je výměnný koeficient roven nule (to znamená, že výměnný koeficient není stanoven), tak proudová pole budou počítány samostatně, přičemž jedinou interakcí je jejich doplňkový objemový zlomek uvnitř každé výpočetní buňky.

3.2.3.3 Výměnný koeficient kapalina-pevná látka

Výměnný koeficient kapalina-pevná látka K_{sl} může být zapsán v obecné formě takto:

$$K_{sl} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{\tau_s} \quad (3.2.3.3.1)$$

Kde tahová funkce f je odlišně definované pro různé modely výměnného koeficientu a τ_s relaxační čas částic a je definován takto:

$$\tau_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_s} \quad (3.2.3.3.2)$$

Kde d_s je průměr částic.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, tak všechny definice tahové funkce f obsahují součinitel odporu vzduchu C_D , které jsou založeny na relativním Reynoldsovém čísle. Je to tahová funkce, která se liší mezi modely výměnných koeficientů.

Syamlalův – O'Brienův model

Tahová funkce f má tvar dle Dalla Valleho[16] :

$$f = \frac{C_D Re_s \alpha_l}{24 v_{r,s}^2} \quad (3.2.3.3.3)$$

Součinitel odporu vzduchu C_D se pro tento model vypočítá:

$$C_D = \left(0,63 + \frac{4,8}{\sqrt{\frac{Re_s}{v_{r,s}}}}\right)^2 \quad (3.2.3.3.4)$$

Tento model je založen na měření koncových rychlostí částic ve fluidních nebo usazených vrstvách s korelacemi, které jsou funkcí objemového zlomku a Reynoldsova čísla [17].

$$Re = \frac{\rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l| d_s}{\mu_l} \quad (3.2.3.3.5)$$

Kde dolní index l značí koeficienty pro l -tou kapalinou fází, s je pro s -tou pevnou fází, d_s je průměr částic s -té pevné fáze.

Rovnice pro výměnný koeficient kapalina-pevná látka pak je ve tvaru:

$$K_{sl} = \frac{3 \alpha_s \alpha_l \rho_l}{4 \cdot v_{r,s}^2 d_s} C_D \left(\frac{Re_s}{v_{r,s}}\right) |\vec{v}_s - \vec{v}_l| \quad (3.2.3.3.6)$$

Kde $v_{r,s}$ je mezní korelace rychlosti pro pevnou fází a ta se vypočítá [18]:

$$v_{r,s} = 0,5 \cdot (A - 0,06Re_s + \sqrt{(0,06 \cdot Re_s)^2 + 0,12Re_s \cdot (2B - A) + A^2}) \quad (3.2.3.3.7)$$

Kde

$$A = \alpha_l^{4,14}, B = 0,8\alpha_l^{1,28} \text{ pro } \alpha_l \leq 0,85, B = 0,8\alpha_l^{2,65} \text{ pro } \alpha_l > 0,85$$

Tento model je vhodný, pokud jsou smyková napětí pevné látky (granulí) definovány podle Syamlala a kol.

Pro tuto problematiku existují další čtyři modely a těmi jsou:

- Gidaspow
- Wen and Yu
- Huilin-Gidaspow
- Gibilaro

3.2.3.4 Výměnný koeficient pro pevná látka-pevná látka

Výměnný koeficient K_{ls} je dán rovnicí:

$$K_{ls} = \frac{3(1 + e_{ls})\left(\frac{\pi}{2} + C_{fe,ls} \frac{\pi^2}{8}\right)\alpha_s\alpha_l\rho_l\rho_s(d_l + d_s)^2 g_{0,ls}}{2\pi \cdot (\rho_l d_l^3 + \rho_s d_s^3)} |\vec{v}_l - \vec{v}_s| \quad (3.2.3.4.1)$$

Kde e_{ls} je koeficient navrácení, $C_{fr,ls}$ je koeficient tření mezi l -tou fází a s -tou fází částic, d_l je průměr částic pevné látky l , $g_{0,ls}$ je radiální distribuční funkce.

3.2.4 Tlak pevných látek (granulí)

Pro granulární proudění ve stlačitelném režimu (tj., když objemový zlomek pevných látek je nižší než je jeho maximální povolená hodnota) je tlak pevných látek počítán samostatně a využívá tlakového gradientu $grad p_s$ v pohybové rovnici granulární fáze. Vzhledem k tomu, že Maxwellianovo rozložení rychlosti se používá pro částice, granulární teplota je zavedena v modelu a objevuje se ve výrazu pro tlak pevných látek a viskozitu. Tlak pevných látek se skládá z kinematického výrazu a druhého výrazu v důsledku kolizí částice:

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s(1 + e_{ss})\alpha_s^2 g_{0,ss} \Theta_s \quad (3.2.4.1)$$

Kde e_{ss} je koeficient navrácení pro kolize částice, $g_{0,ss}$ je radiální distribuční funkce, θ_s je granulační teplota. Výchozí hodnota pro e_{ss} je 0,9, ale hodnota může být upravena tak, aby vyhovovala typu částice. Granulární teplota θ_s je úměrná kinetické energii kolísavému pohybu částic. Funkce $g_{0,ss}$ je distribuční funkce, která upravuje přechod ze “stlačitelného” stavu $\alpha < \alpha_{s,max}$, kde se může vzdálenost mezi částicemi nadále snižovat do “nestlačitelného” stavu $\alpha = \alpha_{s,max}$, kde může dojít k dalšímu snížení odstupu. K dispozici jsou také i jiné formulace [8], [19].

Pokud se počítá více než jedna pevná fáze, tak výše uvedená rovnice nebere v úvahu vliv dalších fází. Známým problémem je, že pevné fáze s identickými vlastnostmi by měli být v rovnováze, když stejné fáze jsou popsány jednou fází pevných látek. Empiricky odvozené rovnice nesplňují tyto podmínky a musejí být odpovídajícím způsobem změněny, aniž by se významně odchylovaly od původní podoby. Obecné formulace tlaku pevných látek v přítomnosti dalších fází může být ve tvaru:

$$p_q = \alpha_q \rho_q \Theta_q + \sum_{p=1}^N \frac{\pi}{3} g_{0,pq} \alpha_{qp}^3 n_p n_q (1 + e_{qp}) f(m_p, m_q, \Theta_p, \Theta_q) \quad (3.2.4.2)$$

Kde $d_{pq} = \frac{d_p + d_q}{2}$, n_p , n_q je počet částic, m_p , m_q je hmotnost částic, f je funkce hmotnosti částic a jejich teploty. Nyní je třeba zjednodušit tento výraz tak, že záleží jen na granulační teplotě fáze q , ale vzhledem k tomu, že všechny modely musí být obsaženy v obecné formě, tak z toho vyplývá, že:

$$p_q = \alpha_q \rho_q \theta_q + \left(\sum_{p=1}^N \frac{d_{pq}^3}{d_q^3} p_{c,qp} \right) \rho_q \theta_q \quad (3.2.4.3)$$

Kde p_c, q_p je kolizní část tlaku mezi fázemi.

3.2.5 Radiální distribuční funkce

Radiální distribuční funkce g_0 je opravující faktor, který mění pravděpodobnost kolize mezi zrny, když pevná granulární fáze se stane hustou. Tato funkce může být také interpretována jako bezrozměrná vzdálenost mezi oblastmi:

$$g_0 = \frac{s + d_p}{s} \quad (3.2.5.1)$$

Kde s je vzdálenost mezi zrny.

Z výše uvedené rovnice (3.2.5.1) je lze zpozorovat, že pro zředěnou pevnou fázi $s \rightarrow \infty$ a tudíž $g_0 \rightarrow 1$. Radiální distribuční funkce úzce souvisí s faktorem χ Chapmanovi a Cowlingovi teorii [20] o nehomogenních plynech. Pro vzácné plyny se χ rovná 1 a zvyšuje se až do nekonečna. ANSYS Fluent má několik možností jak vypočítat radiální distribuční funkci g_0 .

Pro jednu pevnou fázi se používá výraz:

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} \quad (3.2.5.2)$$

Je to empirická funkce a není snadné ji rozšířit na fáze. Pro dvě stejné fáze s vlastností, že $\alpha_q = \alpha_1 + \alpha_2$ výše uvedené funkce neodpovídají pro výpočet dílčích tlaků. ANSYS Fluent řeší tento problém touto formulací:

$$g_0 = \left[1 - \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{s,max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1} + \frac{1}{2} d_l \sum_{k=1}^N \frac{\alpha_k}{d_k} \quad (3.2.5.3)$$

Kde $\alpha_s = \sum_{k=1}^N \alpha_k$,

k jsou pouze pevné fáze.

3.2.6 Limit tvorby shluků v binárních směsích

Limit tvorby shluků nemá stanovené množství a může se měnit v závislosti na množství částic přítomných v daném objemu a průměru částic. Menší částice se shromažďují mezi většími částicemi zvyšující limit tvorby shluků. Pro binární směsi využívá ANSYS Fluent korelace navrhované R.F.Fedorsem a R.F.Landellem [21].

Pro binární směsi s průměry částic $d_1 < d_2$ je kompozice směsi definovaná jako:

$$X_1 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} \quad (3.2.6.1)$$

$$X_1 \leq \frac{\alpha_{1,max}}{(\alpha_{1,max} + (1 - \alpha_{1,max})\alpha_{2,max})} \quad (3.2.6.2)$$

Toto je podmínkou pro aplikaci hranice tvorby shluků pro binární směsi. Maximální limit tvorby shluků pro směs $\alpha_{s,max}$ je tvořena minimálně ze dvou výrazů [4]. Hranice tvorby shluků se využívá pro výpočet radiální distribuční funkce.

3.2.7 Smykové napětí granulí

Napětí pevné látky obsahuje viskozitu smykovou a druhou viskozitu vyplývající z výměny hybnosti v důsledku pohybu a kolize částice. Třecí složka viskozity může být také zahrnuta v případě vzniku viskozně plastického přechodu, který nastane, jakmile dosáhne objemový zlomek částic maximální hodnoty.

Jsou zde přidány kolizní a třecí části a volitelná třecí část, aby předaly smykovou viskozitu pevným látkám:

$$\mu_s = \mu_{s,col} + \mu_{s,kin} + \mu_{s,fr} \quad (3.2.7.1)$$

Kolizní část smykové viskozity je definována [7]:

$$\mu_{s,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\Theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \alpha_s \quad (3.2.7.2)$$

Software ANSYS Fluent řeší kinematickou viskozitu dvěma výrazy. Výchozí rovnice pro ANSYS Fluent je [8]:

$$\mu_{s,kin} = \frac{\alpha_s \rho_s d_s \sqrt{\Theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left[1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss})(3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss}\right] \quad (3.2.7.3)$$

Lze zvolit i jiné vyjádření kinetické viskozity [4], [7].

Druhá viskozita pevných látek zodpovídá za odolnost granulárních částic vůči tlaku a expanzi. To je popsáno rovnicí [22]:

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left(\frac{\Theta_s}{\pi}\right)^{1/2} \quad (3.2.7.4)$$

V proudění při nízkých smykových silách, kde podíl sekundárního prostoru pro pevnou fázi (granule) se přibližuje k limitu tvorby shluků, se napětí generuje hlavně v důsledku tření mezi částicemi. Smykovou viskozitu granulí software ANSYS Fluent ve výchozím nastavení nepočítá. Je-li třecí viskozita zahrnuta ve výpočtu, pak se počítá dle vztahu:

$$\mu_{s,fr} = \frac{p_s \sin \phi}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (3.2.7.5)$$

Kde p_s je tlak pevné látky, ϕ je úhel vnitřního tření, I_{2D} je druhý invariant deviačního napětíového tenzoru. Třecí viskozitu je možné také zadat jako konstantu nebo uživatelem definovanou funkci.

U proudění granulátu s vysokým obsahem podílu pevných látek jsou okamžité kolize částic méně důležité. Uplatnění kinetické teorie pro granulární proudění již není relevantní, protože částice jsou v kontaktu a je třeba vzít v úvahu výsledné třecí napětí. Třecí napětí je psáno v Newtonově tvaru:

$$\tau_{fr} = -p_{fr}\bar{I} + \mu_{fr}(\nabla\vec{u}_s + (\nabla\vec{u}_s)^T) \quad (3.2.7.6)$$

Třecí napětí je přidáno k napětí odhadovaného podle kinetické teorie, kdy objemový zlomek pevných látek překročí kritickou hodnotu. Tato hodnota je obvykle nastavena na hodnotu 0,5, kdy průtok je trojrozměrný a maximální hranice tvorby shluků je okolo 0,63. Potom:

$$p_s = p_{kin} + p_{fr} \quad (3.2.7.7)$$

$$\mu_s = \mu_{kin} + \mu_{fr} \quad (3.2.7.8)$$

Odvození třecího tlaku je především semi-empirické, zatímco třecí viskozita může být odvozena z prvních principů. Použitím modifikovaného Coulombova zákona lze dojít k výrazu ve formě:

$$\mu_{fr} = \frac{p_{fr}\sin\phi}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (3.2.7.9)$$

Třecí tlak je definován takto:

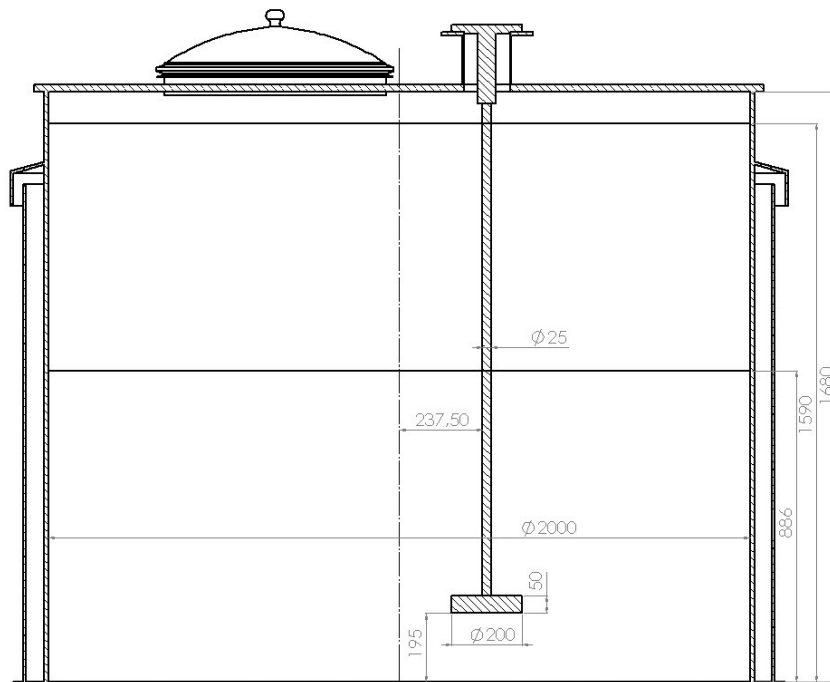
$$p_{fr} = Fr \frac{(\alpha_s - \alpha_{s,min})^n}{(\alpha_{s,max} - \alpha_s)^p} \quad (3.2.7.10)$$

$$Fr = 0,1\alpha_s$$

(3.2.7.11)

4. Řešení zadané nádrže

Dle zadání byla vymodelována nádrž se zadanými parametry viz obr. 4.1, kde nejdůležitějšími parametry pro řešení je průměr nádrže $d_n = 2000$ mm, maximální přípustné plnění nádrže (1590 mm) a teoretická výška vrstvy granulované močoviny (886 mm).



Obr. 4.1 Rozměry nádrže

4.1 Výpočet výšky a koncentrace granulí v nádrži

Známé parametry granulované močoviny:

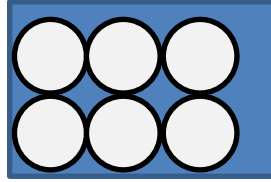
Průměr	$d_g = 1,5$ mm
Hustota	$\rho_g = 1330$ kg / m ³
Teplota	$t_g = 35$ °C
Měrná tepelná kapacita	$c_{pg} = 1575$ J / kg · K
Hmotnost	$m_g = 2000$ kg

Parametry vody:

Teplota	$t_v = 54$ °C
Hmotnost	$m_v = 3300$ kg

Výpočty pro variantu 1

Následující výpočty jsou provedeny pro případ, kdy se granule močoviny skládají na sebe viz obr. 4.1.1.



Obr. 4.1.1 Vrstvení granulí

Počet řad granulí v jedné vrstvě:

$$n_r = \frac{d_n}{d_g} = \frac{2000}{1,5} = 666$$

Vzorový výpočet rozměru prvního poloměru r_1 :

$$r_1 = \frac{d_n}{2} - (2 \cdot n_{r1} - 1) \cdot \frac{d_g}{2} = \frac{2000 \cdot 10^{-3}}{2} - (2 \cdot 1 - 1) \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,99925 \text{ m}$$

Vzorový výpočet obvodu poloměru r_1 :

$$o_1 = 2 \cdot \pi \cdot r_1 = 2 \cdot \pi \cdot 0,99925 = 6,2785 \text{ m}$$

Vzorový výpočet počtu granulí na obvodu o_1 :

$$n_1 = \frac{o_1}{d_n} = \frac{6,2785}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 4185$$

Počet granulí ve vrstvě:

$$n_v = \sum n_i + 1 = 1395931$$

Kde $\sum n_i$ je součet všech počtu granulí na obvodech.

Celkový počet granulí:

$$n_c = \frac{m_g}{\rho_g V_g} = \frac{2000}{1330} \cdot 10^{-9} = 85095748$$

Objem granule:

$$V_g = \frac{1}{6} \pi \cdot d_g^3 = \frac{1}{6} \pi \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 1,767 \cdot 10^{-9} m^3$$

Počet vrstev granulí:

$$x_g = \frac{n_c}{n_v} = \frac{85095748}{1395931} = 610$$

Celková výška granulí v nádrži:

$$h_c = x_g \cdot d_g = 610 \cdot 1,5 = 915 \text{ mm} = 0,915 \text{ m}$$

Objem celkové výšky granulí v nádrži:

$$V_c = \frac{\pi d_n^2}{4} \cdot h_c = \frac{\pi \cdot 2^2}{4} \cdot 0,915 = 2,875 m^3$$

Celkový objem granulí ve vrstvě:

$$V_{gv} = \left(\frac{1}{6} \pi \cdot d_g^3 \right) \cdot n_c = \left(\frac{1}{6} \pi \cdot 0,0015^3 \right) \cdot 85095748 = 1,504 m^3$$

Objem vody ve vrstvě granulí:

$$V_v = V_c - V_{gv} = 2,875 - 1,504 = 1,371 m^3$$

Objemová koncentrace granulí ve vrstvě:

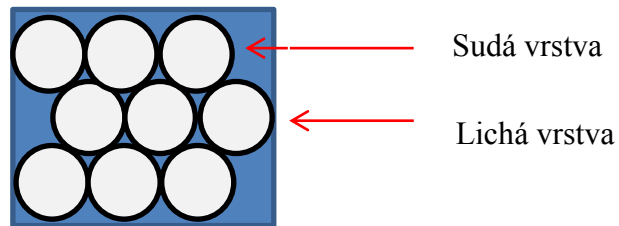
$$c_g = \frac{V_{gv}}{V_c} \cdot 100 = \frac{1,504}{2,875} \cdot 100 = 52,3 \%$$

Objemová koncentrace vody ve vrstvě granulí:

$$c_v = \frac{V_v}{V_c} \cdot 100 = \frac{1,371}{2,875} \cdot 100 = 47,7 \%$$

Výpočty pro variantu 2

Varianta č. 2 počítá s případem, kdy granule mezi sebe zapadají, jak je znázorněno na obr. 4.1.2.



Obr. 4.1.2 Vrstvení granulí

Počet řad zůstává stejný $n_r = 666$. Výpočty jsou nyní rozděleny na lichou a sudou vrstvu.

Lichá vrstva

Vzorový výpočet rozměru prvního poloměru r_1 :

$$r_1 = \frac{d_n}{2} - (2 \cdot n_{r1} - 1) \cdot \frac{d_g}{2} = \frac{2000 \cdot 10^{-3}}{2} - (2 \cdot 1 - 1) \cdot \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,99925 \text{ m}$$

Vzorový výpočet obvodu poloměru r_1 :

$$o_1 = 2 \cdot \pi \cdot r_1 = 2 \cdot \pi \cdot 0,99925 = 6,2785 \text{ m}$$

Vzorový výpočet počtu granulí na obvodu o_1 :

$$n_1 = \frac{o_1}{d_n} = \frac{6,2785}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 4185$$

Sudá vrstva

Vzorový výpočet rozměru prvního poloměru r_{1s} :

$$r_{1s} = \frac{d_n}{2} - 1 \cdot d_g = \frac{2000 \cdot 10^{-3}}{2} - 1 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,9985 \text{ m}$$

Vzorový výpočet obvodu poloměru r_{1s} :

$$o_{1s} = 2 \cdot \pi \cdot r_1 = 2 \cdot \pi \cdot 0,99925 = 6,2738 \text{ m}$$

Vzorový výpočet počtu granulí na obvodu o_{1s} :

$$n_{1s} = \frac{o_1}{d_n} = \frac{6,2738}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 4182$$

Počet granulí ve vrstvě (sudá + lichá):

$$n_{vsl} = \sum n_{is} + n_{il} = 2789764$$

Počet vrstev granulí:

$$x_{gsl} = \frac{n_c}{n_{vsl}} = \frac{85095748}{2789764} = 306$$

Celková výška granulí v nádrži:

$$h_{csl} = \left(\sqrt{d_g^2 - \frac{d_g^2}{2}} + d_g \right) \cdot x_{gsl} = \left(\sqrt{0,0015^2 - \frac{0,0015^2}{2}} + 0,0015 \right) \cdot 306$$
$$= 0,857m$$

Objem celkové výšky granulí v nádrži:

$$V_{csl} = \frac{\pi d_n^2}{4} \cdot h_{csl} = \frac{\pi \cdot 2^2}{4} \cdot 0,857 = 2,691 m^3$$

Celkový objem granulí ve vrstvě:

$$V_{gv} = \left(\frac{1}{6} \pi \cdot d_g^3 \right) \cdot n_c = \left(\frac{1}{6} \pi \cdot 0,0015^3 \right) \cdot 85095748 = 1,504 m^3$$

Objem vody ve vrstvě granulí:

$$V_{vsl} = V_{csl} - V_{gv} = 2,691 - 1,504 = 1,187 m^3$$

Objemová koncentrace granulí ve vrstvě:

$$c_{gsl} = \frac{V_g}{V_{csl}} = \frac{1,504}{2,691} = 0,523$$

Objemová koncentrace vody ve vrstvě granulí:

$$c_{vsl} = \frac{V_{vsl}}{V_{csl}} = \frac{1,187}{2,691} = 0,441$$

Do software ANSYS Fluent byly zadány průměrné hodnoty objemové koncentrace granulí. To znamená, že bylo bráno v úvahu, že se granule vrství v nádrži variantou 1 a variantou 2. Taktéž byla zadána průměrná výška vrstvy granulí.

Průměrná objemová koncentrace granulí:

$$c_{\phi g} = \frac{c_{gsl} + c_g}{2} = \frac{0,559 + 0,523}{2} = 0,54$$

Průměrná výška vrstvy granulí:

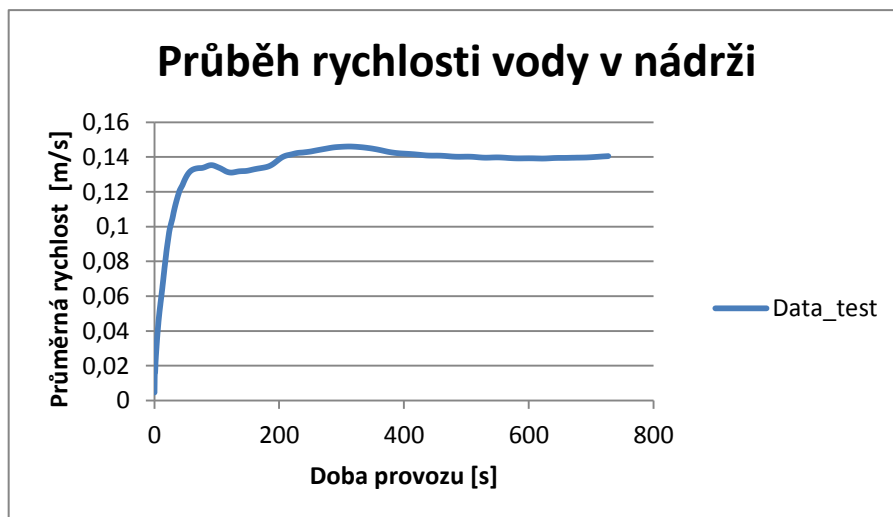
$$h_{\phi g} = \frac{h_{csl} + h_c}{2} = \frac{0,857 + 0,915}{2} = 0,886 \text{ m}$$

Úhlová rychlost míchadla:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n_m = 2 \cdot \pi \cdot \frac{920}{60} = 96 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

4.2 Testovací výpočet

Z důvodu odhadnutí času potřebného pro výpočet byl vytvořen model v software Fluent, který obsahuje pouze jednu fázi a to vodu. V programu ANSYS Fluent byl nastaven pouze viskózní model k-epsilon standard. Vícefázový model byl vypnut, protože se počítala pouze jedna fáze. Dále byl nastaven monitorovací bod, kde se sledovala průměrná rychlost vody v nádrži v závislosti na čase, viz obr. 4.2.1.



Obr. 4.2.1 Graf průběhu rychlosti v nádrži

Z grafu lze usoudit, že k ustálení rychlosti vody dojde přibližně po 300 sekundách provozu, takže na tuto dobu byl nastaven výpočet pro jednotlivé varianty.

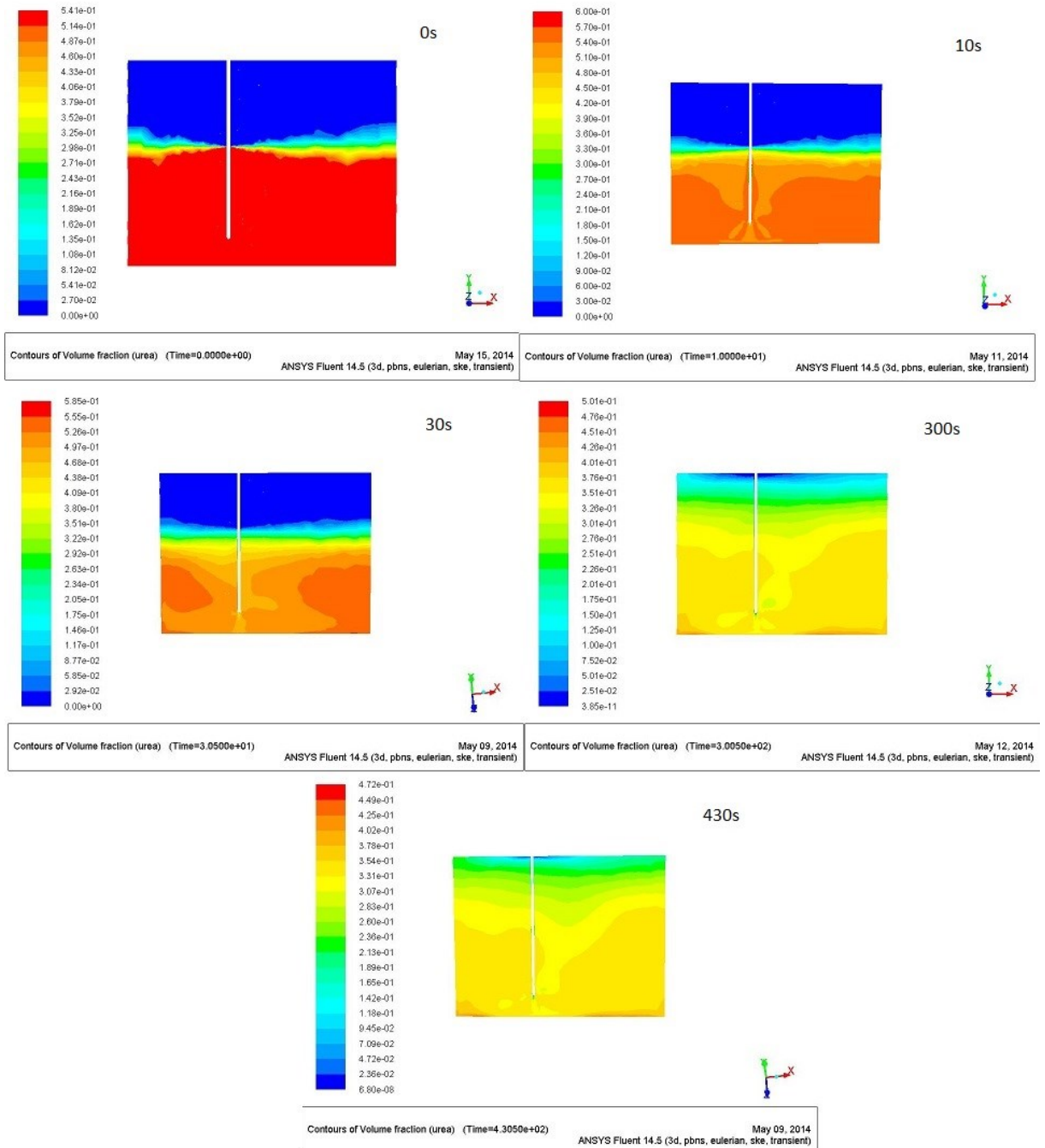
4.3 Výpočet CFD simulace

Pro výpočet této problematiky je použit vícefázový Eulerův model, který obsahuje dvě fáze a to vodu a granule. Model je řešený jako 3D úloha z důvodu toho, že míchadlo je nesymetricky uloženo v nádrži. Výpočet je rozdělen do čtyř časových úseků (z důvodu urychlení výpočtu s přijatelnou přesností), které obsahují rozdílné časové kroky:

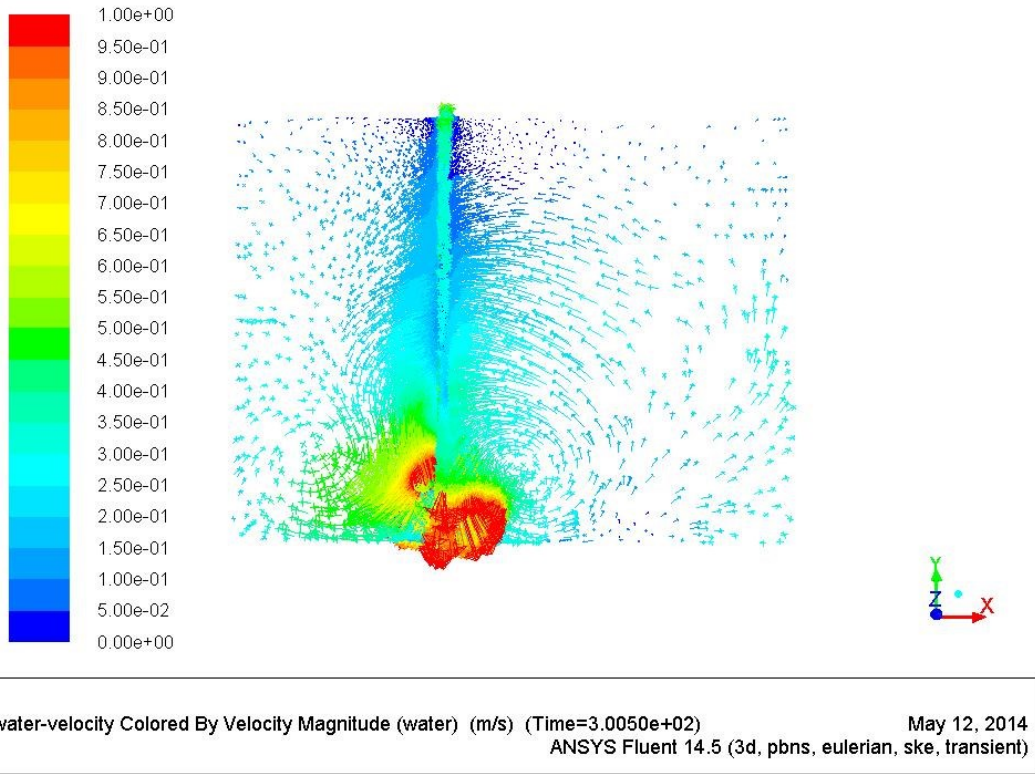
- Pro první sekundu míchání je časový krok 0,005 s.
- 1 – 10 sekund je časový krok 0,05 s.
- 10 – 30 sekund je časový krok 0,5 s.
- 30 a více sekund je časový krok 2 s.

4.3.1 Výsledky simulace zadané nádrže

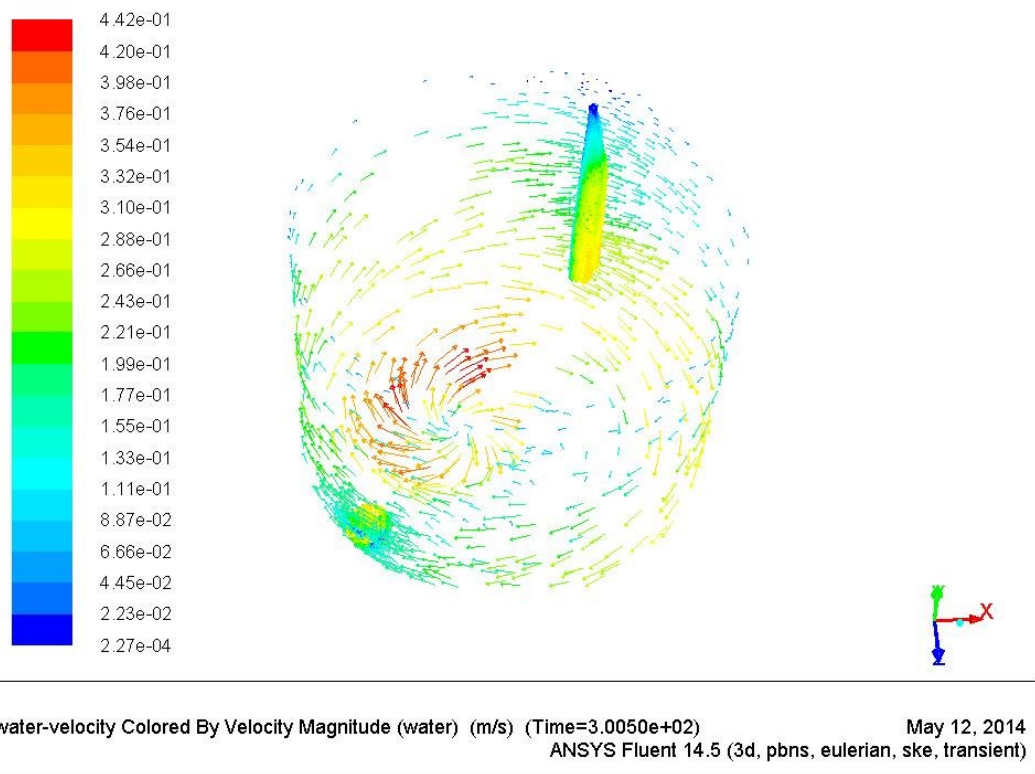
V tomto případě nádrž neobsahuje žádné navrhované vestavby. Nádrž je vymodelována na základě výkresové dokumentace, jak je zobrazeno na obr. 4.1.



Obr. 4.3.1.1 Kontury objemového zlomku granulí v řezu nádrže

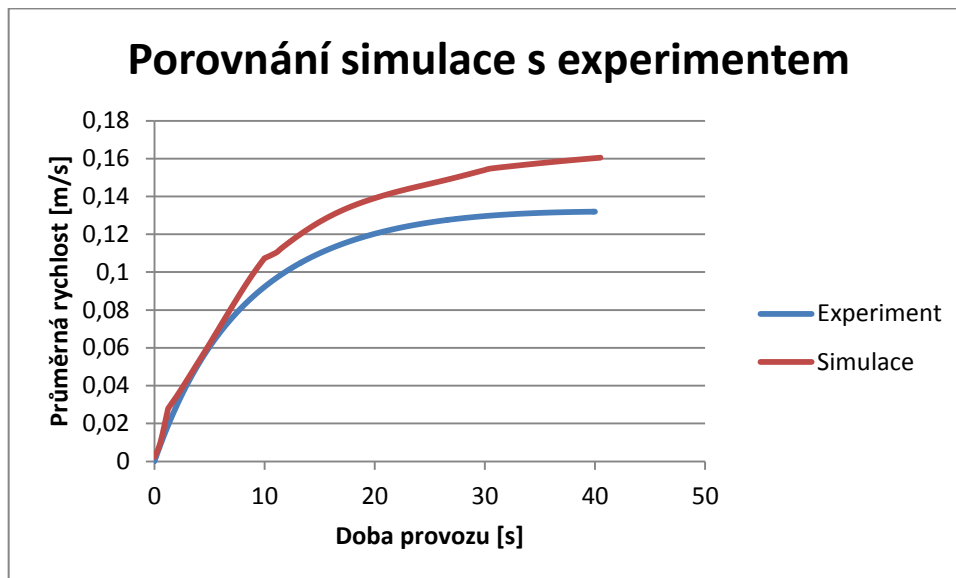


4.3.1.2 Vektory rychlosti vody v řezu po 300 sekundách provozu



Obr. 4.3.1.3 Vektory rychlostí vody na stěnách nádrže po 300 sekundách provozu

4.3.1.1 Porovnání výsledků simulace s experimentem

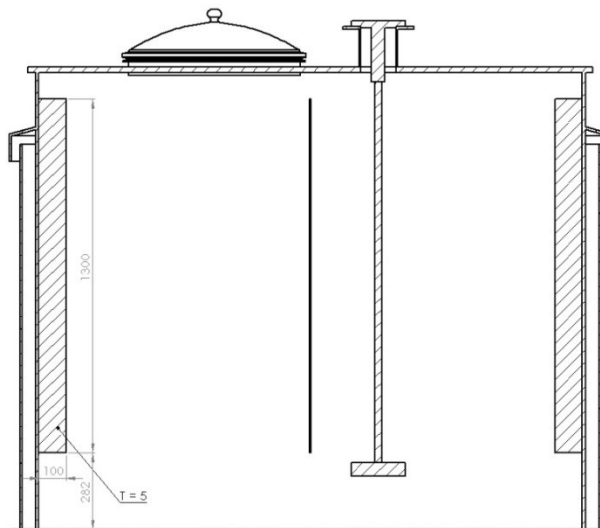


Obr. 4.3.1.1.1 Graf doby rozběhu v nádrži

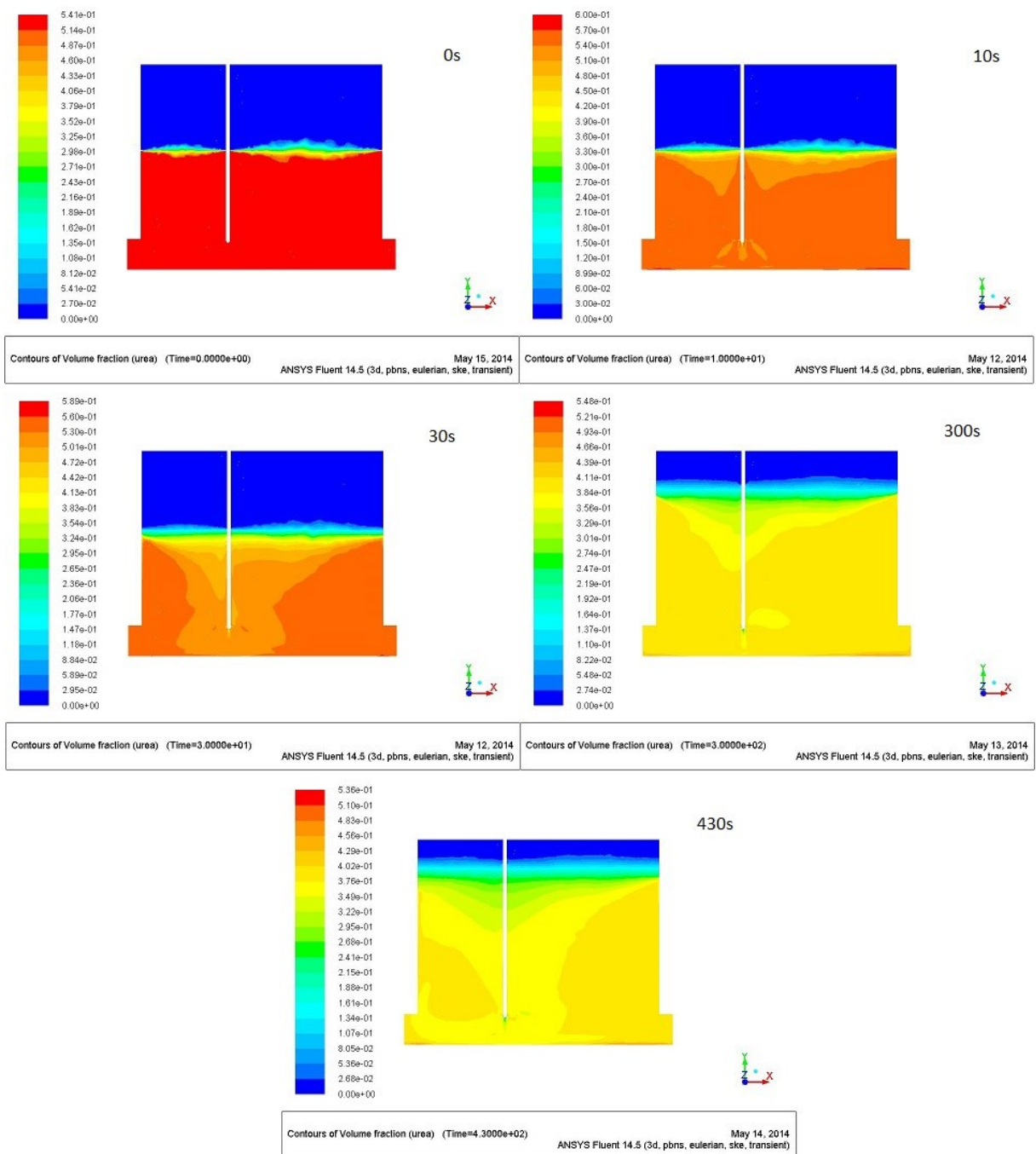
Z grafu lze vyčíst, že se výsledky rychlosti ze simulace liší od naměřených hodnot. To může být způsobeno tím, že při simulaci nebyly brány odpory stěny atd.

4.3.2 Výsledky simulace navrhované varianty 1

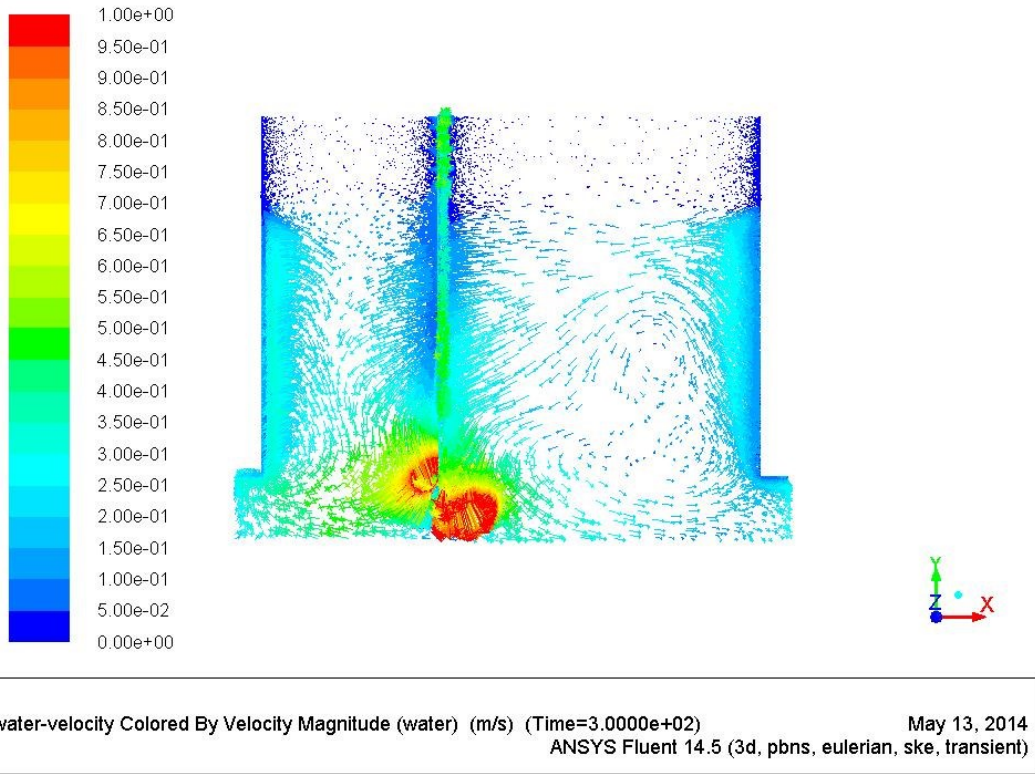
Varianta 1 obsahuje lamelovou vestavbu na stěně nádrže, jak je zobrazeno na obr. 4.3.2.1. Nádrž obsahuje čtyři svisle uložené lamely odstupňovaných po 90°.



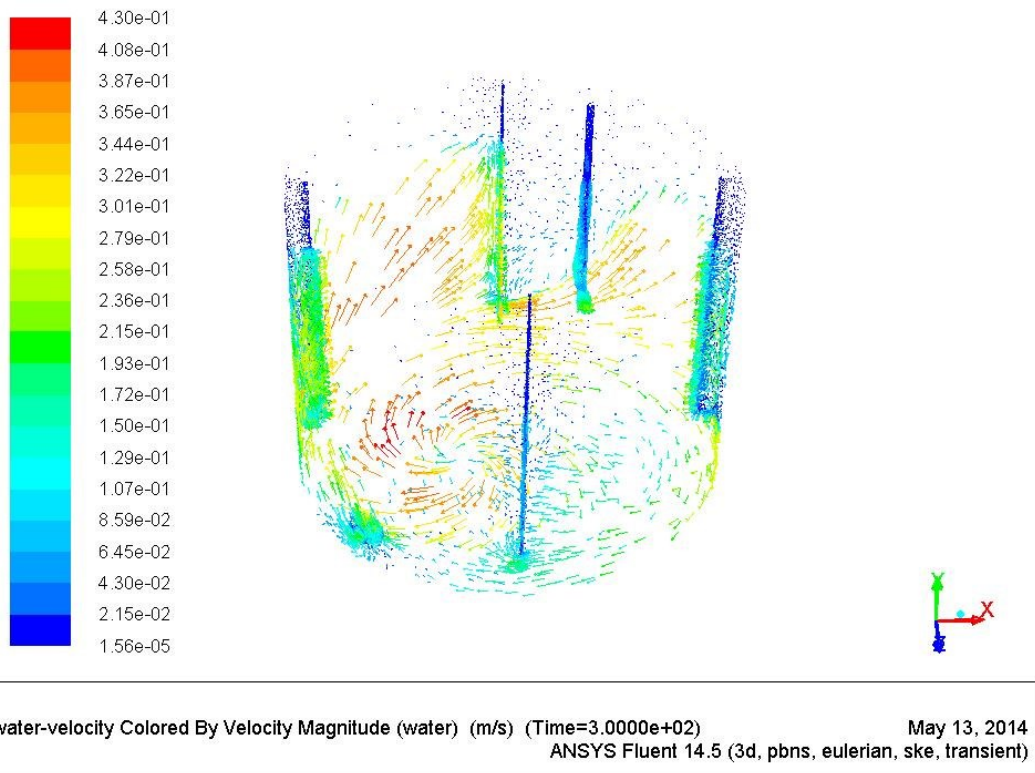
Obr. 4.3.2.1 Nádrž s vestavbou



Obr. 4.3.2.2 Kontury objemového zlomku granulí v řezu nádrže



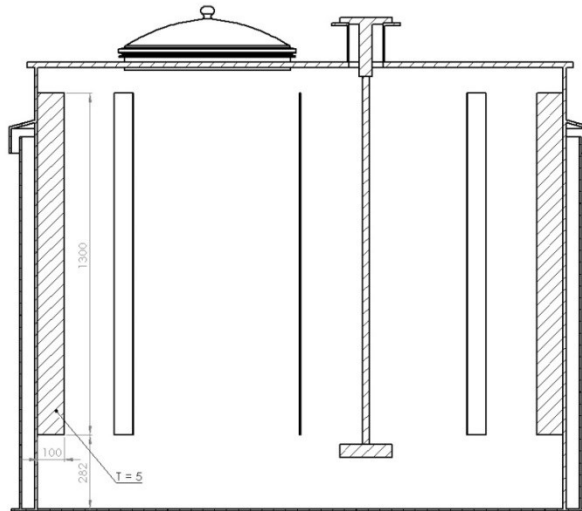
Obr. 4.3.2.3 Vektory rychlosti vody v řezu po 300 sekundách provozu



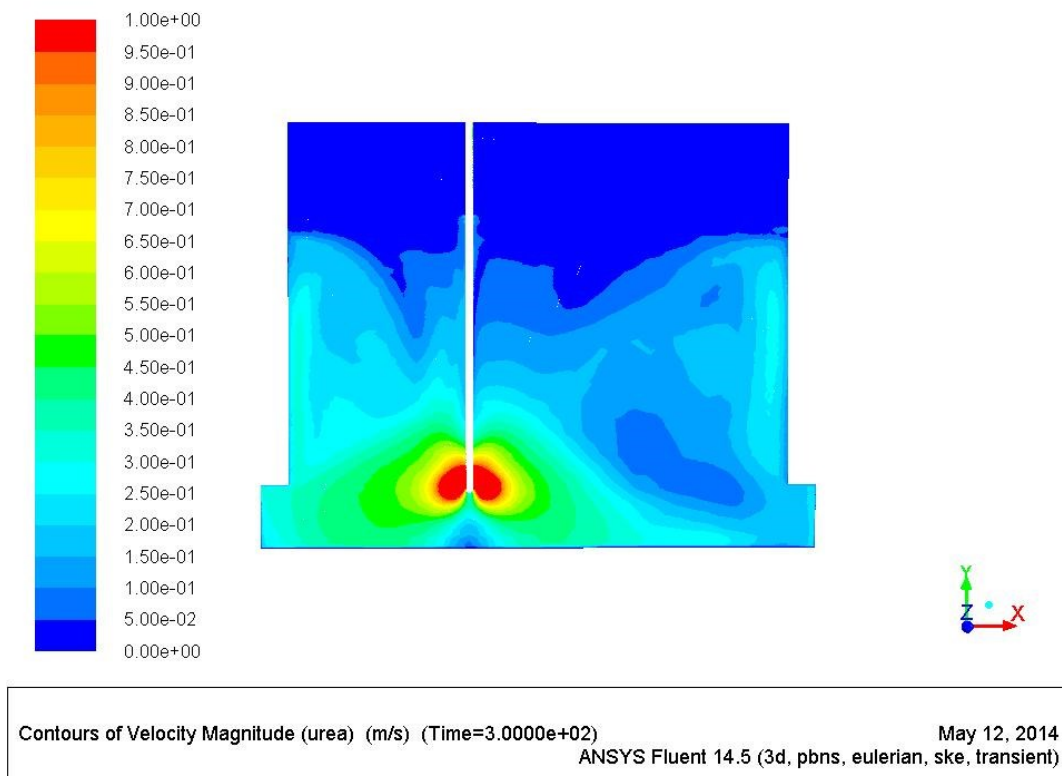
Obr. 4.3.2.4 Vektory rychlosti vody na stěně nádrže po 300 sekundách provozu

4.3.3 Výsledky simulace navrhované varianty 2

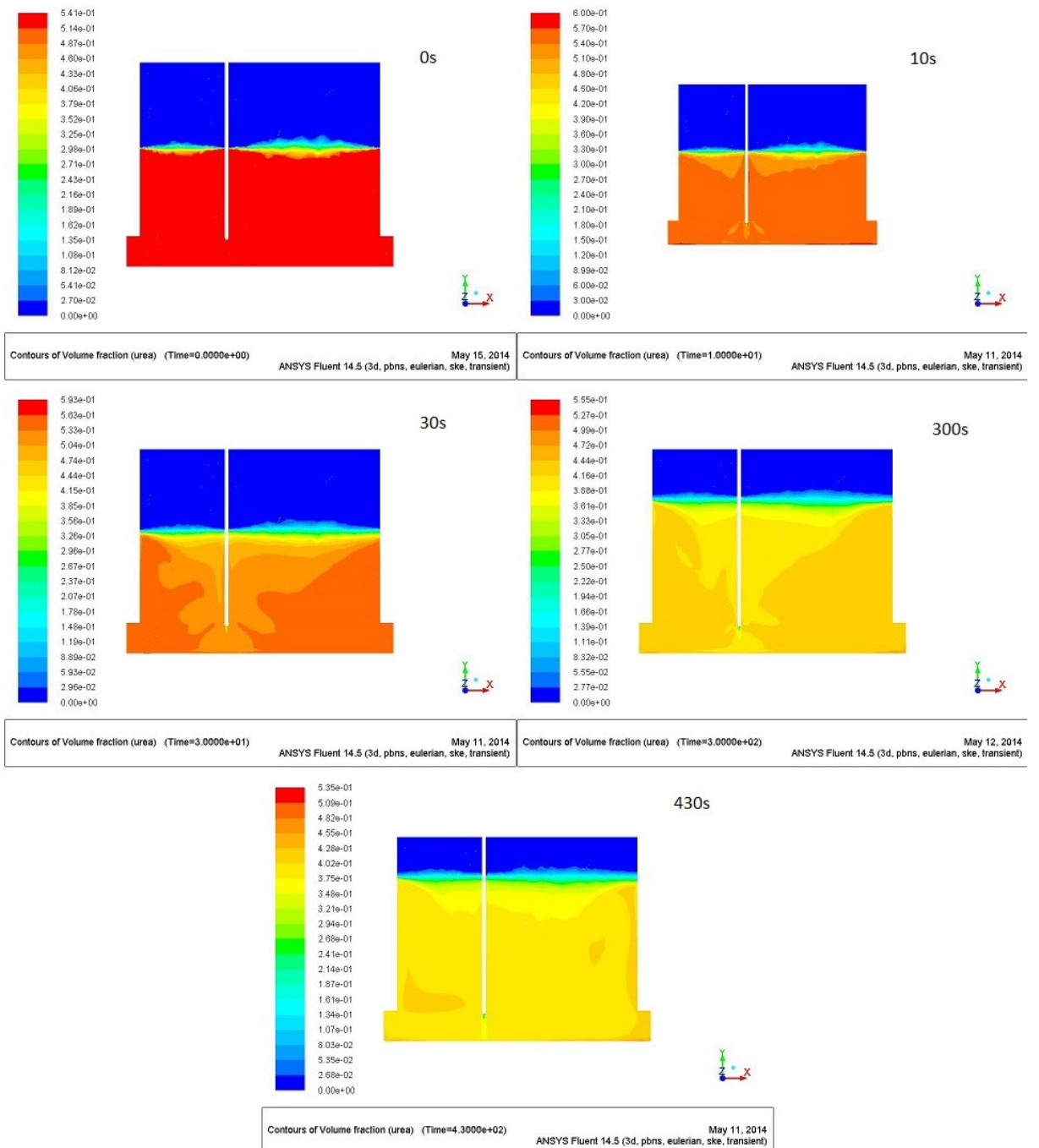
Varianta 2 má stejnou vestavbu jako varianta 1, liší se pouze v počtu lamel. V tomto případě je použito osm svisle uložených lamel odstupňovaných po 45° obr. 4.3.3.1.



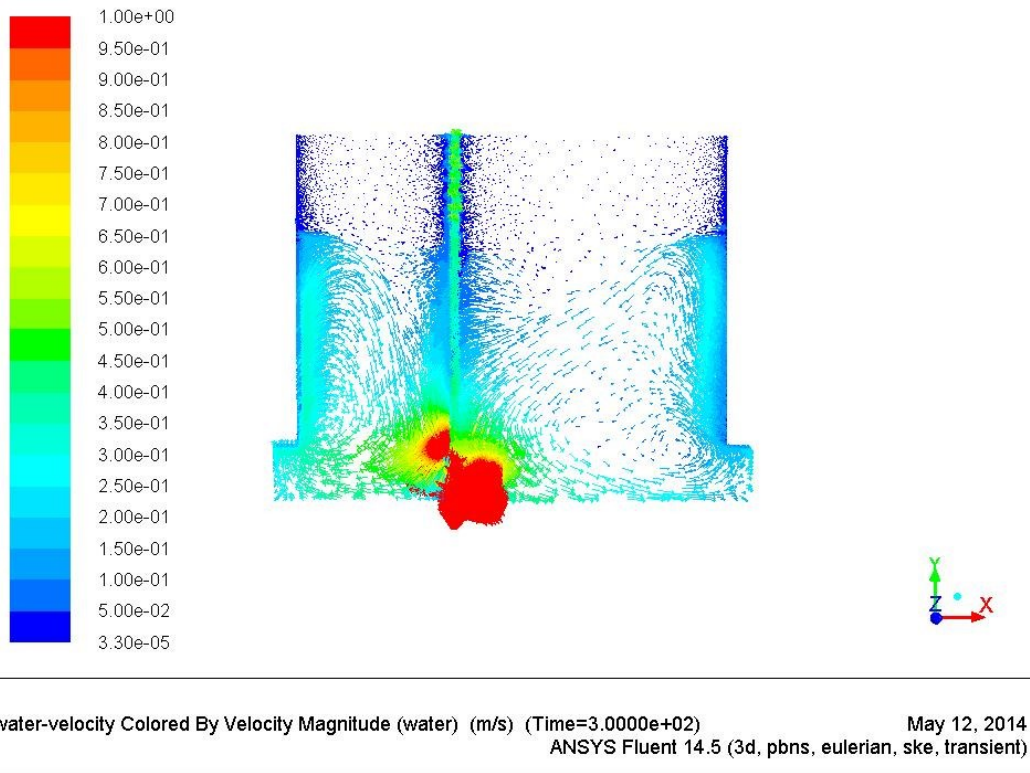
Obr. 4.3.3.1 Nádrž s vestavbou



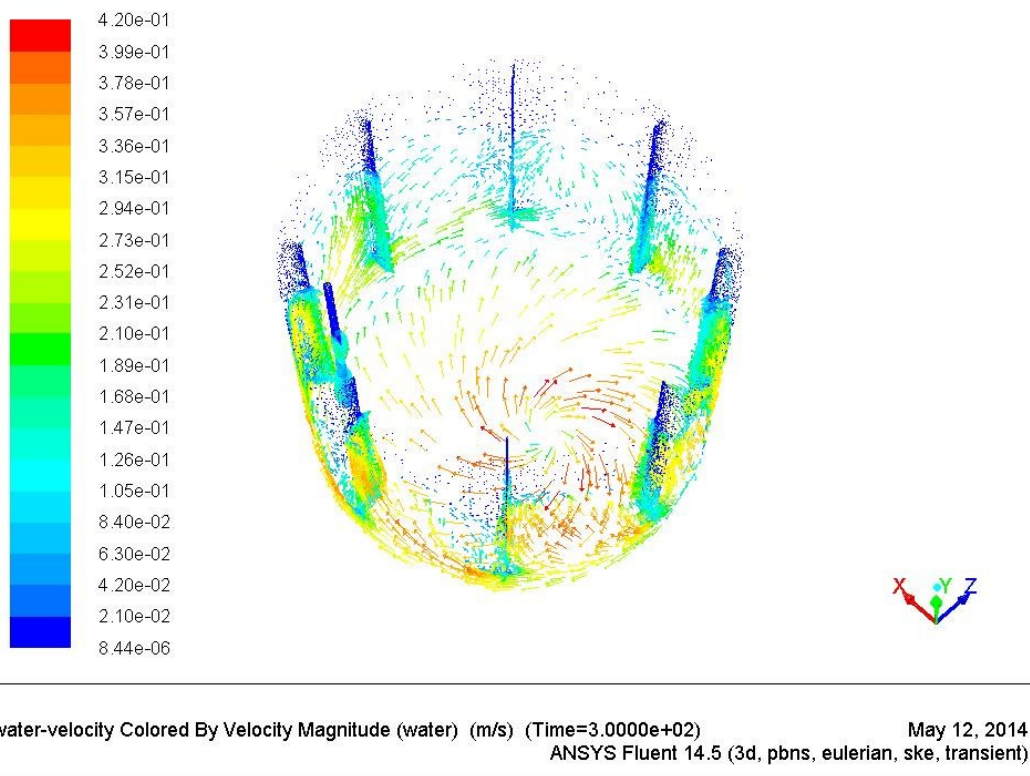
Obr. 4.3.3.2 Kontury rychlosti granulí po 300 sekundách provozu



Obr. 4.3.3.3 Kontury objemového zlomku granulí v řezu



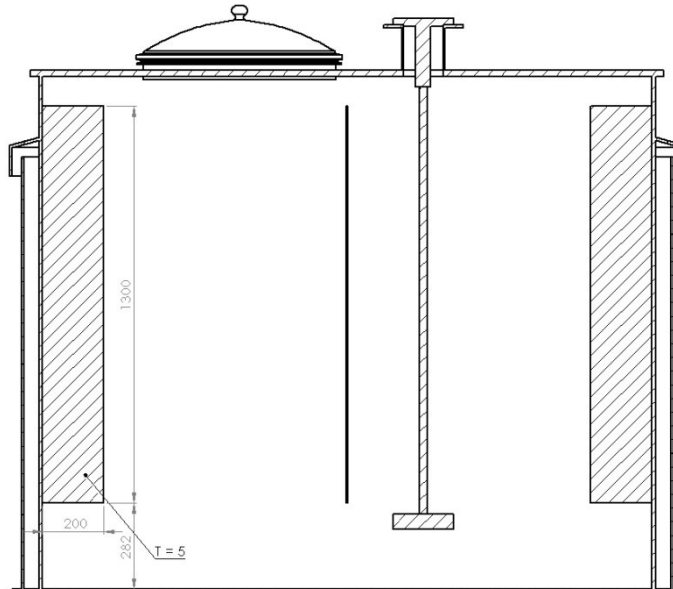
Obr. 4.3.3.4 Vektory rychlosti vody v řezu nádrže po 300 sekundách provozu



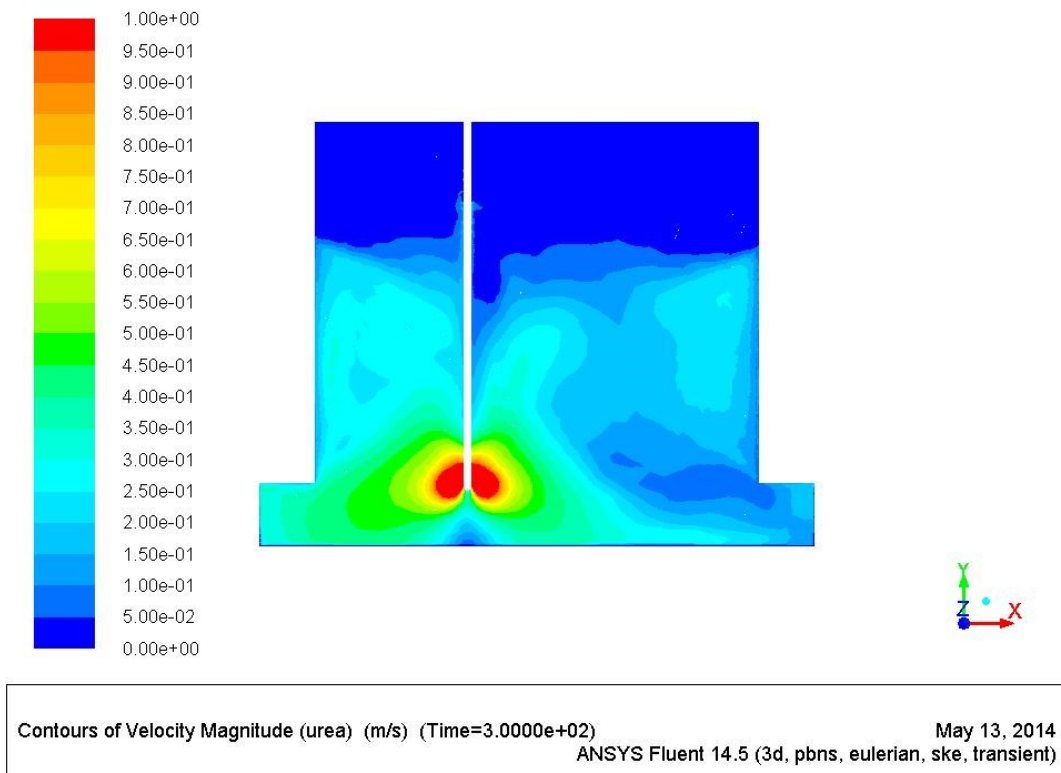
Obr. 4.3.3.5 Vektory rychlosti vody na stěnách nádrže po 300 sekundách provozu

4.3.4 Výsledky simulace navrhované varianty 3

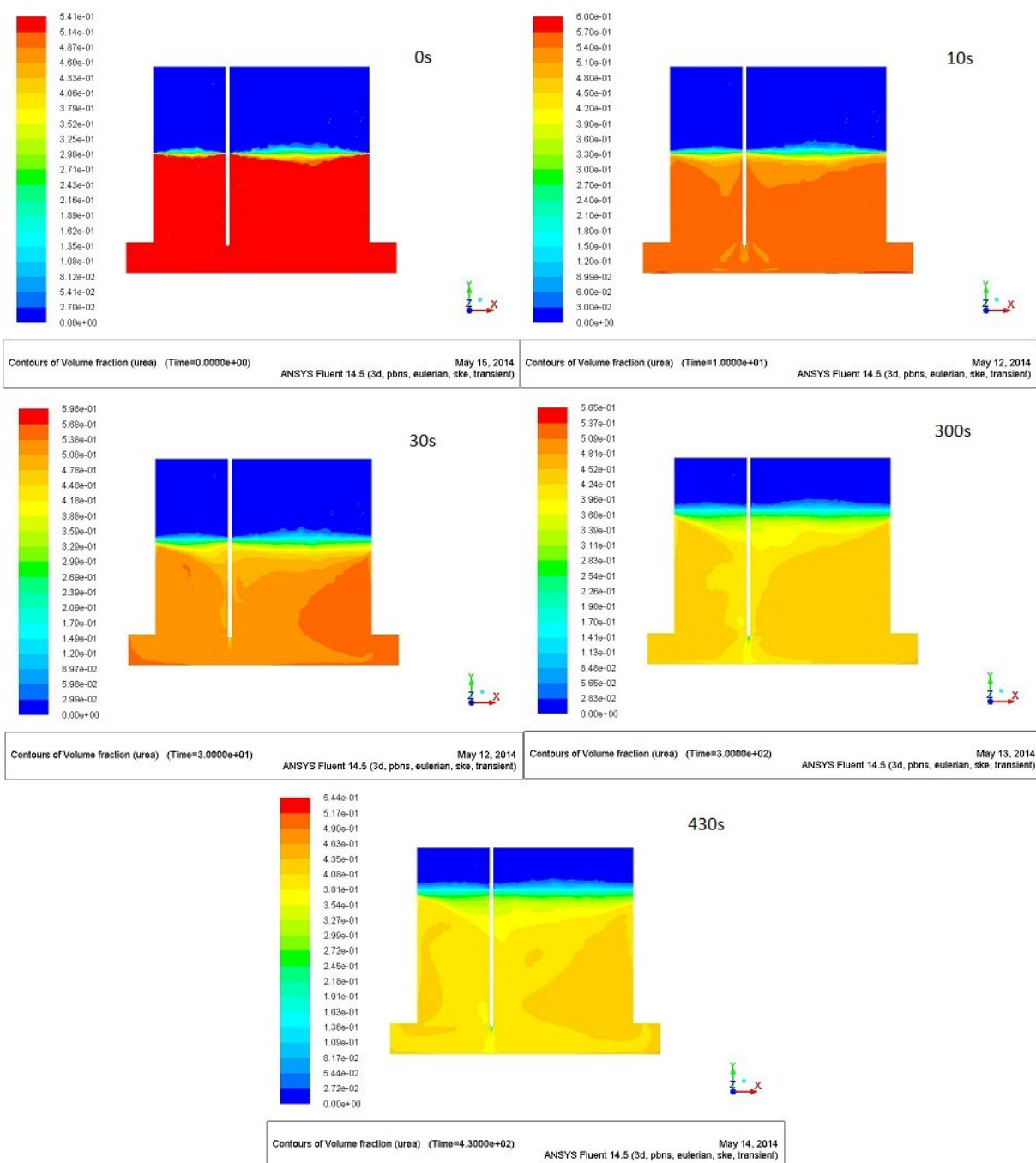
Varianta 3 obsahuje čtyři svisle uložené lamely odstupňované po 90°, jejichž šířka je větší oproti předešlým variantám obr. 4.3.4.1.



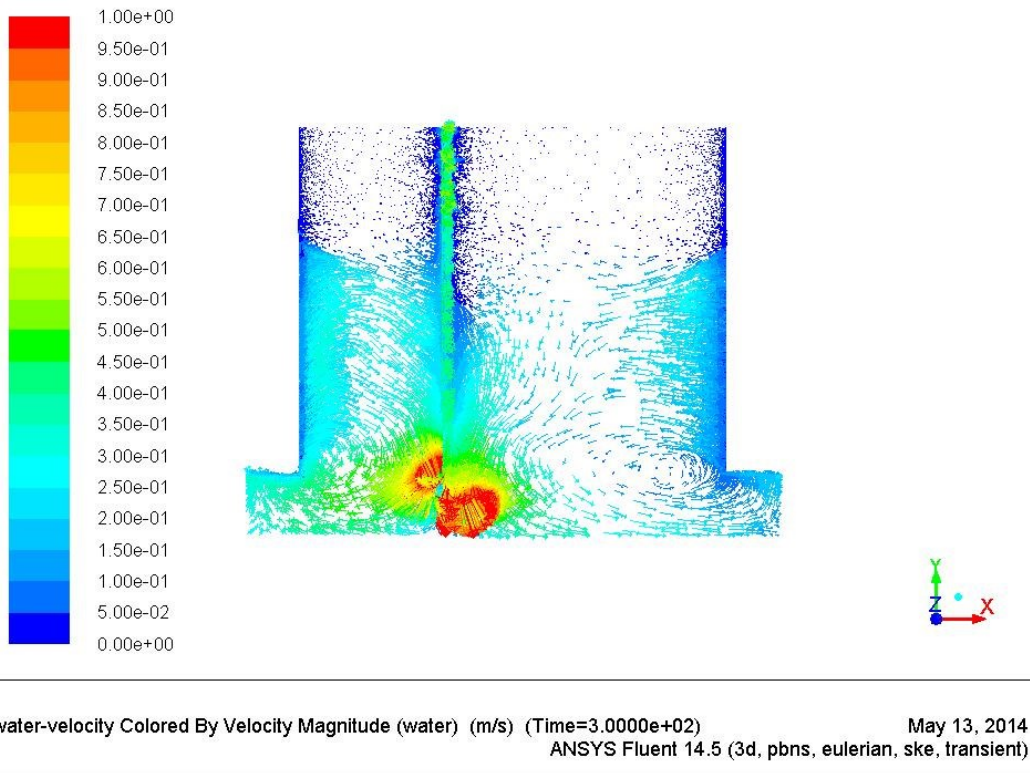
Obr. 4.3.4.1 Nádrž s vestavbou



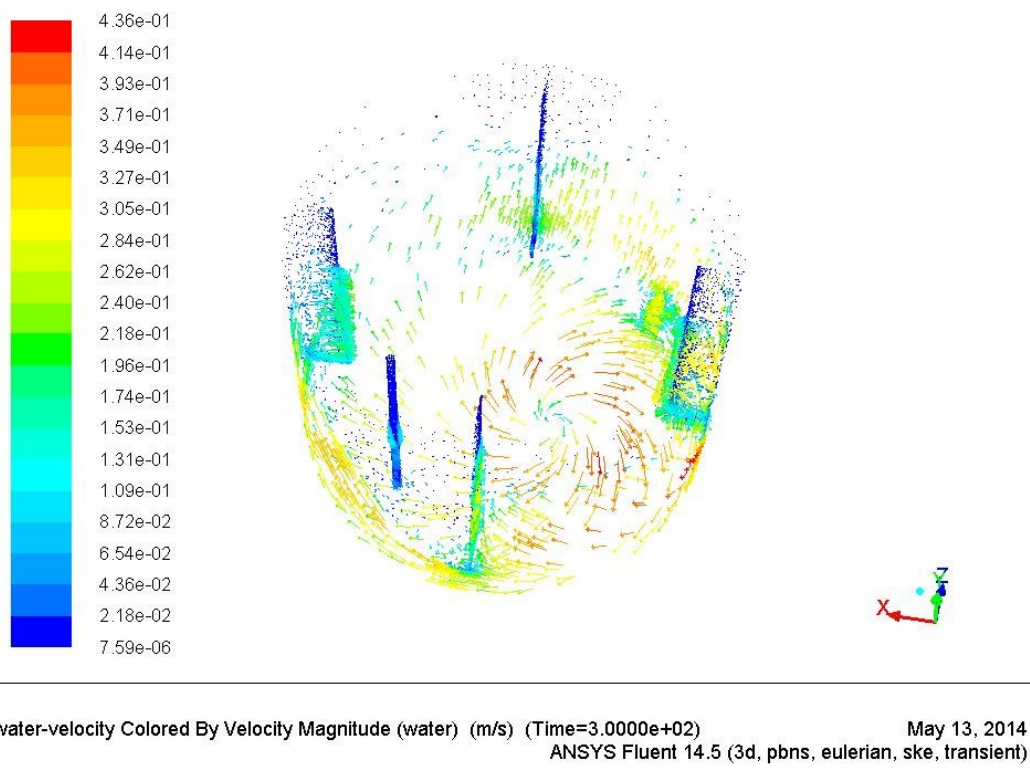
Obr. 4.3.4.2 Kontury rychlosti granulí po 300 sekundách provozu



Obr. 4.3.4.3 Kontury objemového zlomku granúl v řezu



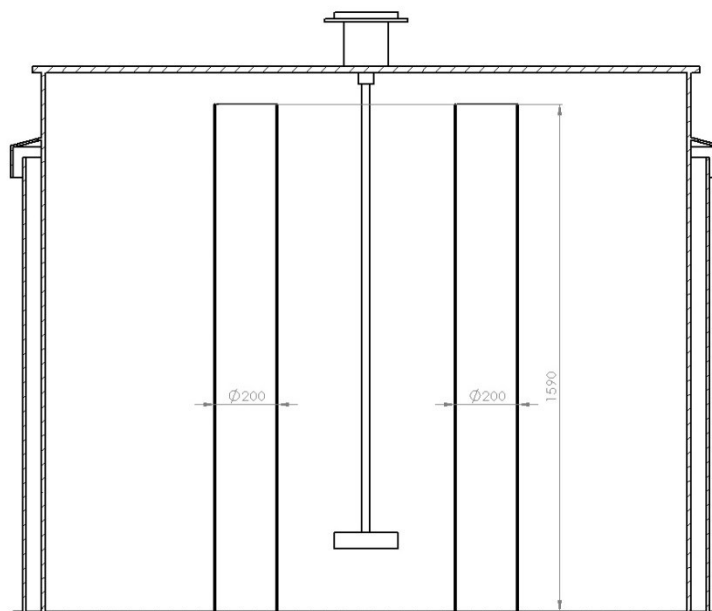
Obr. 4.3.4.4 Vektory rychlosti vody v řezu nádrže po 300 sekundách provozu



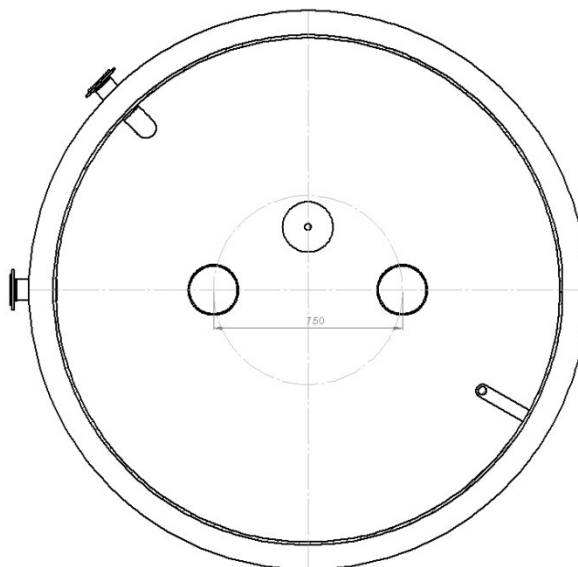
Obr. 4.3.4.5 Vektory rychlosti vody na stěnách nádrže po 300 sekundách provozu

4.3.5 Výsledky simulace navrhované varianty 4

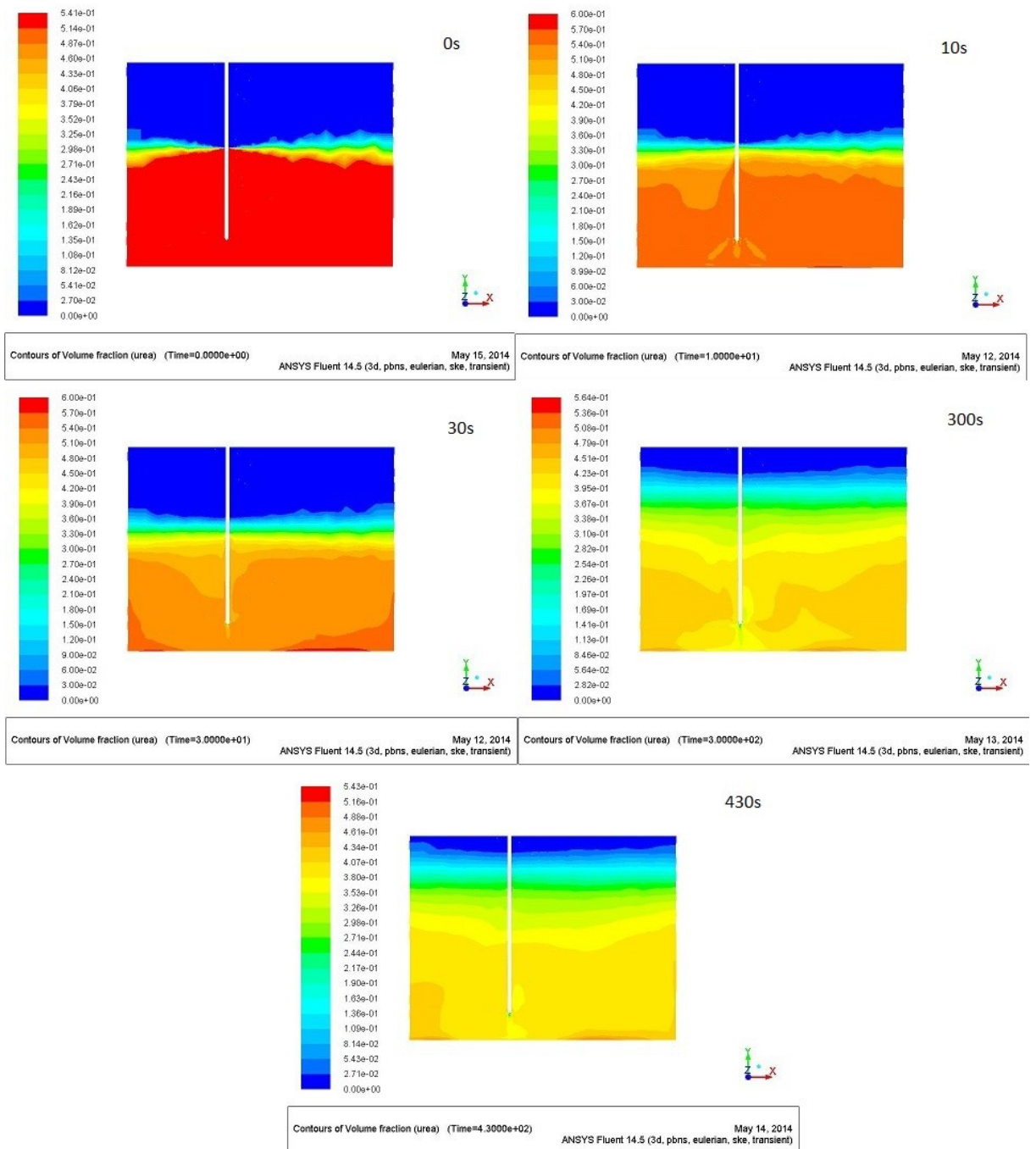
Varianta 4 obsahuje dvě svisle uložené trubky umístěné na dně nádrže obr. 4.3.5.1, obr. 4.3.5.2.



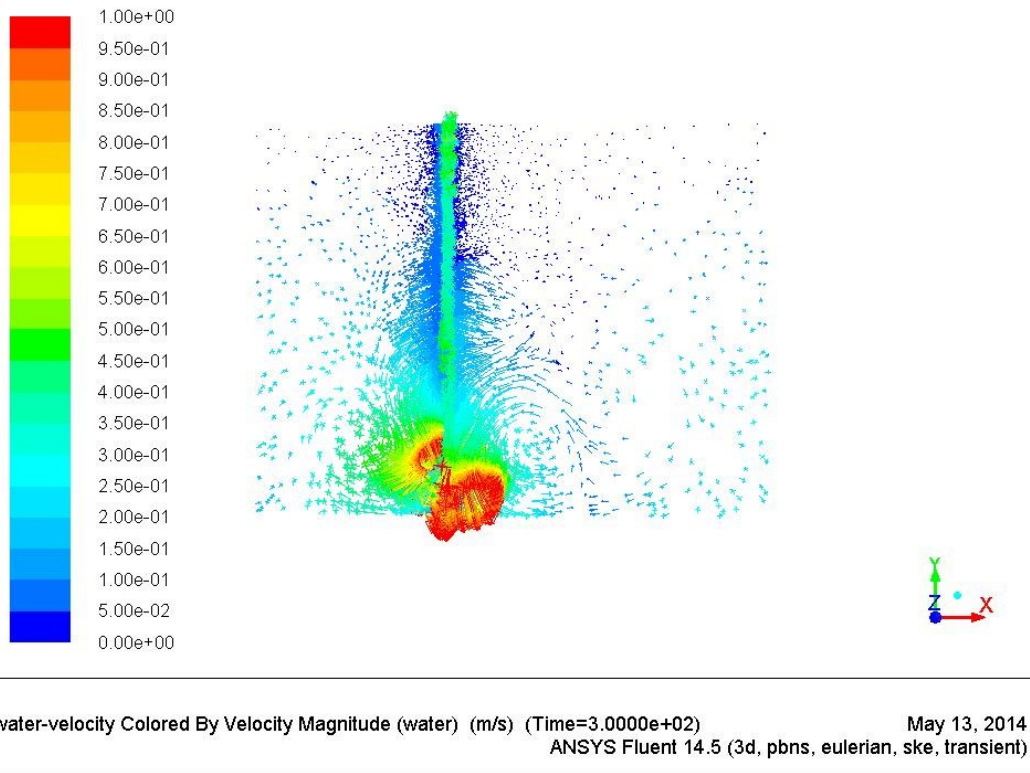
Obr. 4.3.5.1 Nádrž s vestavbou



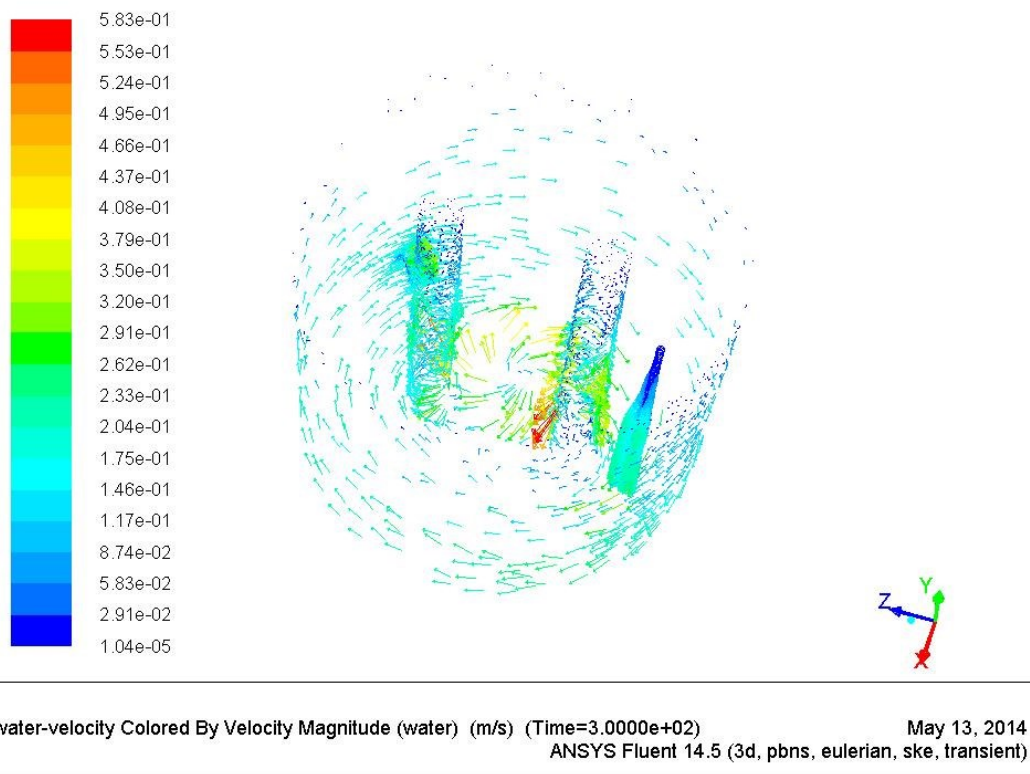
Obr. 4.3.5.2 Nádrž s vestavbou



Obr. 4.3.5.3 Kontury objemového zlomku granulí v řezu



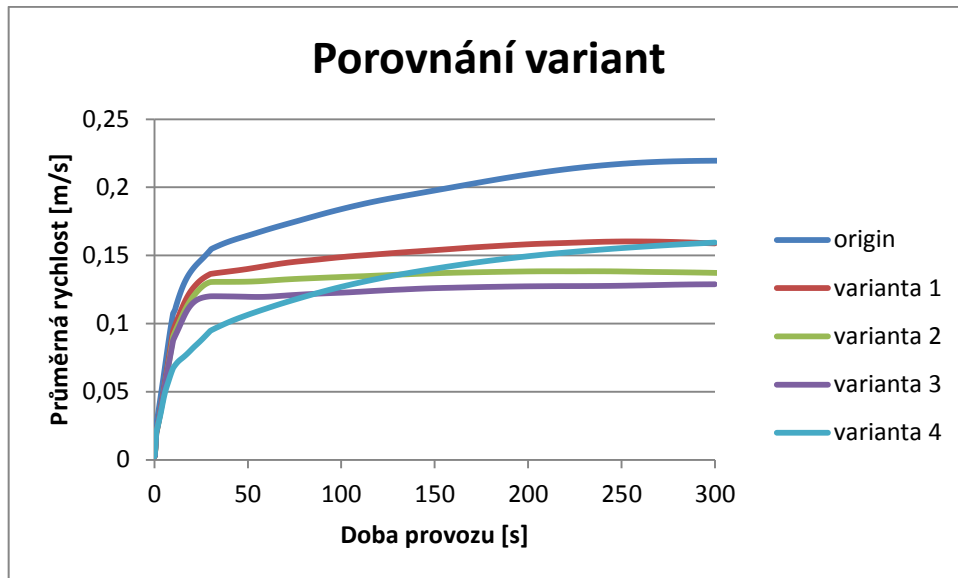
Obr. 4.3.5.4 Vektory rychlosti vody v řezu po 300 sekundách provozu



Obr. 4.3.5.4 Vektory rychlosti vody na stěnách nádrže po 300 sekundách provozu

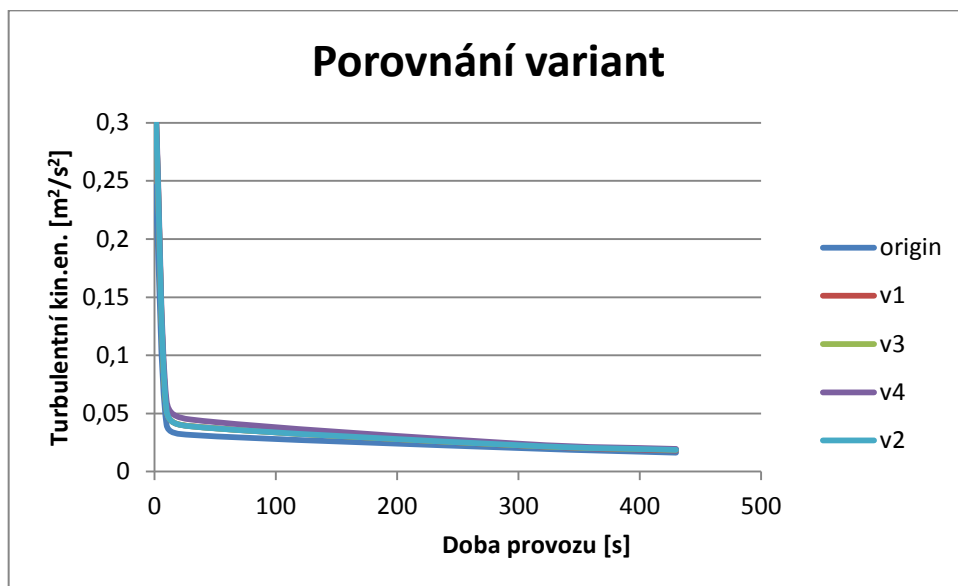
4.4 Stanovení nejefektivnější vestavby

Pro stanovení nejefektivnější vestavby v nádrži bylo využito hodnot průměrné rychlosti v nádrži obr. 4.4.1 a průměrné turbulentní energie v nádrži obr. 4.4.2.

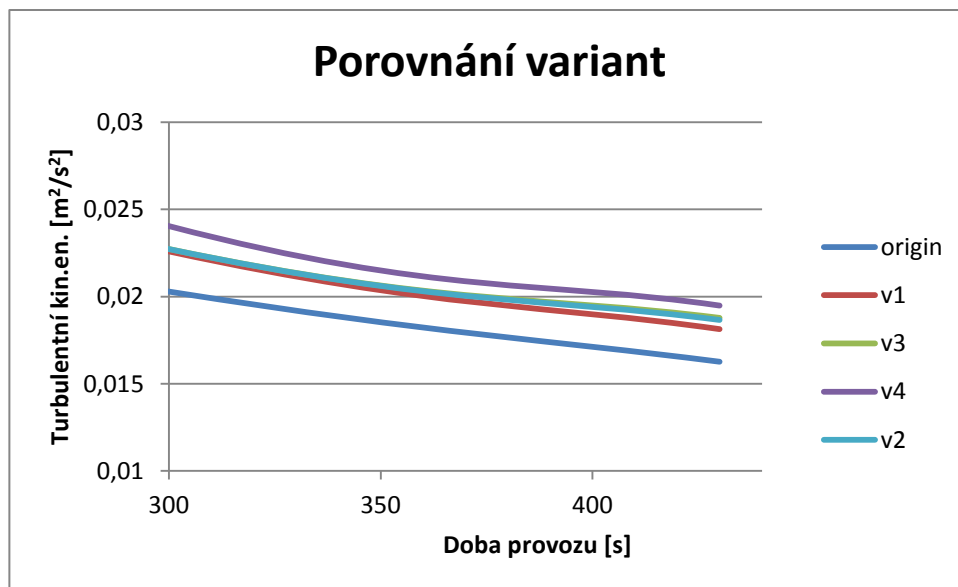


Obr. 4.4.1 Graf průběhů průměrných rychlostí v nádrži

Dle grafu lze usoudit, že nejlepší varianta pro urychlení homogenizace směsi je varianta č. 3, kdy dojde nejrychleji k ustálení rychlosti v nádrži.

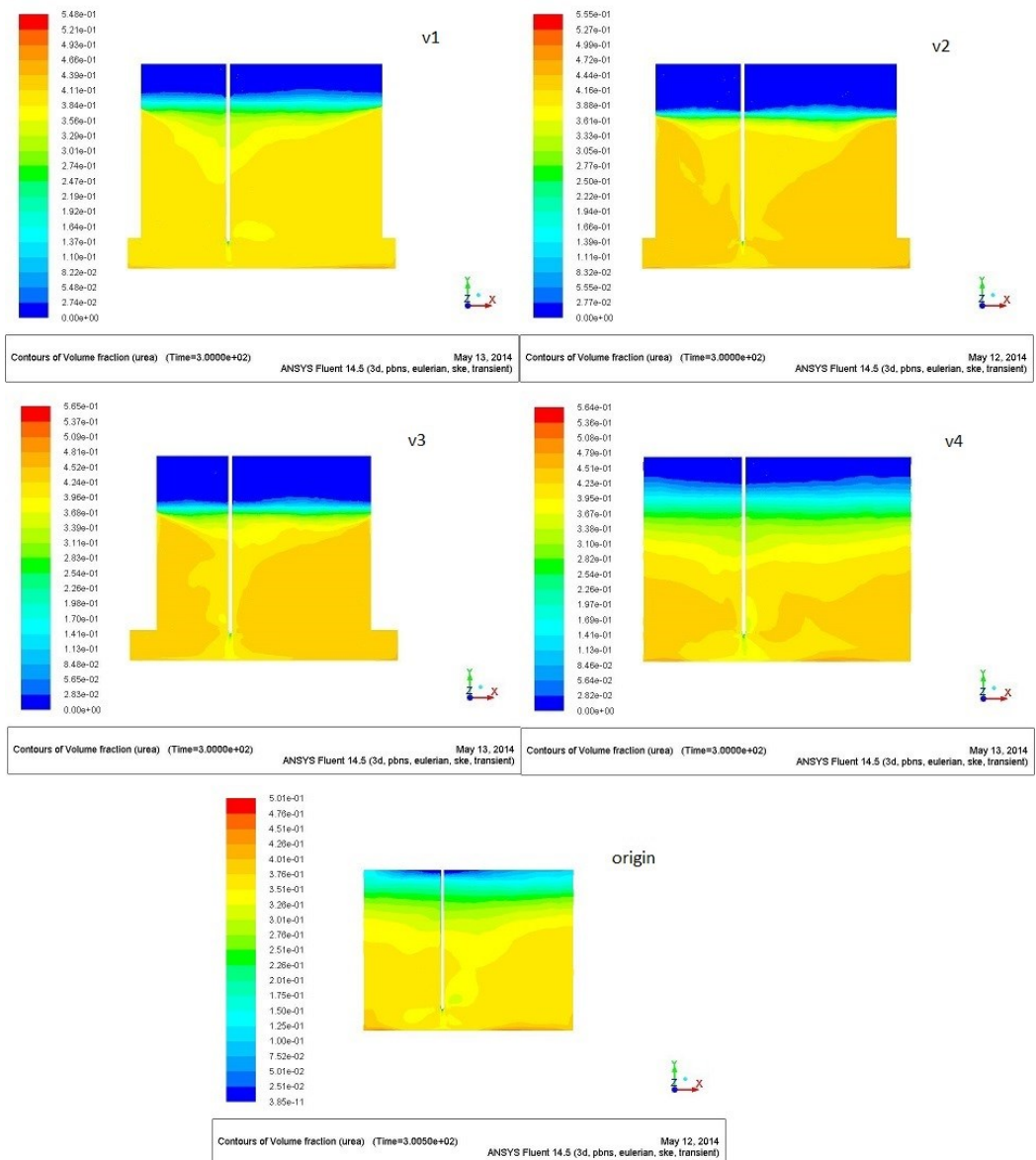


Obr. 4.4.2 Graf průběhů průměrných kinetických energií v nádrži



Obr. 4.4.3 Graf průběhů průměrných kinetických energií v nádrži

Na základě obr. 4.4.3 lze tvrdit, že nejlepší podmínky pro urychlení homogenizace bude mít varianta vestavby č. 4.



Obr. 4.4.4 Porovnání kontur objemového zlomku granulí všech variant

5. Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit CFD simulaci procesu míchání granulí močoviny v nádrži a následně získané data ze simulace následně porovnat s naměřenými daty z experimentu. Dalším cílem bylo vytvořit 2 až 3 varianty vestaveb do nádrže, které by homogenizaci urychlily. Geometrie byla vytvořena dle výkresové dokumentace. CFD model je vytvořený v software ANSYS Fluent 14.5.

Byla provedena CFD simulace procesu míchání granulí a vody v nádrži. Úloha byla řešena ve 3D, protože míchadlo je nesymetricky uloženo v míchací nádrži. Na počátku byly granule usazeny na dně nádrže a následně bylo spuštěno vrtulové míchadlo se zadanými parametry. Vypočtená data byla následně porovnána s naměřenými daty z experimentu, kde se porovnávalo ustálení rychlosti vody v nádrži. Data ze simulace se lišila od naměřených hodnot z experimentu o zhruba 20 %. To bylo zřejmě zapříčiněno tím, že při simulaci byly stěny modelu ideálně hladké.

Simulace byla realizována bez procesu rozpouštění granulí močoviny z důvodu časové náročnosti výpočtu a proto, že byla úloha řešena ve 3D, což mělo také velký vliv na dobu výpočtu. Při výpočtu se sledovaly parametry objemového zlomku granulí ve vodě a to minimální a maximální. Objemové zlomky se ale nijak výrazně neměnily, protože byly v nádrži místa, kde nedocházelo k dostatečnému promíchání (usazené shluky granulované močoviny), tudíž zůstaly objemové zlomky takřka konstantní. Dále se sledovala průměrná rychlost v nádrži, jak vody, tak granulí. Určení samotné homogenizace směsi je tedy určeno na základě ustálení rychlosti vody a granulí a na výsledcích turbulentní kinetické energie vody v nádrži.

Z výsledků simulace zadané nádrže (bez vestavby) lze usoudit, že k homogenizaci směsi dojde v tomto případě nejpomaleji v porovnání s ostatními variantami. Navrhované varianty s lamelami na stěnách nádrže patří k nejlepším variantám, ale dle grafických výsledků nemají granule dostatečnou rychlost ve vyšších místech nádrže, takže nedojde k dostatečnému promíchání ve vyšších místech nádrže. Z důvodu nedostatku času, nebylo možno provést simulace variant s nižšími lamelami, či nakloněnými lamelami, které by mohly dle mého úsudku mít lepší výsledky než provedené simulace.

Nicméně aby se potvrdil výrok, že nejlepší varianta jsou lamelové vestavby v nádrži, tak byla vyhodnocena další data ze simulace a to průměrná turbulentní kinetická energie, jelikož turbulence má velký vliv na homogenizaci směsi. Dle těchto dat je nejefektivnější vestavba č. 4, kdy je vestavba tvořena trubkami. Na základě výsledků simulací navrhuji pro urychlení homogenizace variantu č. 4 nebo variantu č. 3.

6. Seznam použité literatury

- [1] Kozubková, M., Blejchař, T., Bojko, M. *Modelování přenosu tepla, hmoty a hybnosti* [online]. VŠB-TU Ostrava, 2011. Dostupné z http://www.338.vsb.cz/PDF/Modelovani_prenosu_tepla_hmoty_a_hybnosti-KOZUBKOVA.pdf>
- [2] http://help.solidworks.com/2013/czech/SolidWorks/cosmosxpresshelp/c_Why_Analyze_.htm
- [3] Drábková, S. a kol. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2007. 248 s. (Elearningová učebnice). ISBN 978-80-248-1508-4.
- [4] FLUENT: Fluent 14.5 - *User's guide*. Fluent Inc. 2012.
- [5] M. Manninen, V. Taivassalo, and S. Kallio. "On the mixture model for multiphase flow". VTT Publications 288 Technical Research Centre of Finland. 1996.
- [6] L. Schiller and Z. Naumann. "Z. Ver. Deutsch. Ing.. 77. 318. 1935.
- [7] D. Gidaspow, R. Bezburuah, and J. Ding. "Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach". In *Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*. 75–82. 1992.
- [8] M. Syamlal, W. Rogers, and O'Brien T. J. *MFIX Documentation: Volume 1, Theory Guide*. National Technical Information Service, Springfield, VA. DOE/METC-9411004, NTIS/DE94000871993.
- [9] C. K. K. Lun, S. B. Savage, D. J. Jeffrey, and N. Chepuruiy. "Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field". *J. Fluid Mech.* 140. 223–256. 1984.
- [10] T. Hibiki and M. Ishii. "One-group Interfacial Area Transport of Bubbly Flows in Vertical Round Tubes". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 43. 2711–2726. 2000.
- [11] S. Kim, Q. Wu, and M. Ishii. "One-group Interfacial Area Transport in Vertical Bubbly Flow". *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 41. 1103–1112. 1997.
- [12] T. B. Anderson and R. Jackson. "A Fluid Mechanical Description of Fluidized Beds". *I & EC Fundam.* 6. 527–534. 1967.
- [13] R. M. Bowen. "Theory of Mixtures". In A. C. Eringen, editor *Continuum Physics*. Academic Press, New

York. 1–127. 1976.

[14] D. A. Drew and R. T. Lahey. *In Particulate Two-Phase Flow*. Butterworth-Heinemann. Boston, MA509–566. 1993.

[15] S. A. Morsi and A. J. Alexander. "An Investigation of Particle Trajectories in Two-Phase Flow Systems". *J. Fluid Mech.* 55(2). 193–208. September 26 1972.

[16] J. M. Dalla Valle. *Micromeritics*. Pitman, London. 1948.

[17] J. R. Richardson and W. N. Zaki. "Sedimentation and Fluidization: Part I". *Trans. Inst. Chem. Eng.* 32. 35–53. 1954.

[18] J. Garside and M. R. Al-Dibouni. "Velocity-Voidage Relationships for Fluidization and Sedimentation". *I & EC Process Des. Dev.* 16. 206–214. 1977.

[19] D. Ma and G. Ahmadi. "A Thermodynamical Formulation for Dispersed Multiphase Turbulent Flows". *Int. J. Multiphase Flow*. 16. 323–351. 1990.

[20] S. Chapman and T. G. Cowling. *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases*. 3rd edition. Cambridge University Press, Cambridge, England. 1990.

[21] R. F. Fedors and R. F. Landell. "An Empirical Method of Estimating the Void Fraction in Mixtures of Uniform Particles of Different Size". *Powder Technology*. 23. 225–231.

[22] C. K. K. Lun, S. B. Savage, D. J. Jeffrey, and N. Chepuriniy. "Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field". *J. Fluid Mech.* 140. 223–256. 1984.

[23] J. Ding and D. Gidaspow. "A Bubbling Fluidization Model Using Kinetic Theory of Granular Flow". *AIChE J.* 36(4). 523–538. 1990.

[24] <http://www.cad.cz/strojirenstvi/38-strojirenstvi/3604-simulace-proudeni-tekutin-pomoci-cfd.html>

7. Přílohy

Page 1 of 1

EKATO FLUID

Agitator specification

N°.: 7125.180465.20 Quantity: 1 01.08.2008 / SHA
 Customer: Mehldau & Steinfath Item:
 Umwelttechnik GmbH
 Serial no.: 08/76397/10/1

Application: Homogenizing
Viscosity: 1 mPas **Density:** 1100 kg/m³
Operating conditions: **Vessel:**
 Operating pressure: 1 bar abs. Filling volume: 5,2 m³
 Operating temperature: 65 °C Diameter d1: 2000 mm
 Ambient temperature: 40 °C Filling height: 1800 mm
 Ex-zone, inside/outside: none | none Total height: 2100* mm
 Temperature class: - (Distance agitator support – vessel bottom)

Mounting: 250 mm excentrical, vertical position, without baffles
 The agitator can also operate during filling and emptying of the vessel. Velocity during alteration of liquid level > 40 mm/min.

MD 25

Drive:
 Three phase motor with reinforced bearing,
 3 x 400 V, 50 Hz, IP 55, Iso F
Power: 0.75 kW
Speed: 920 rpm
Explosion class: none

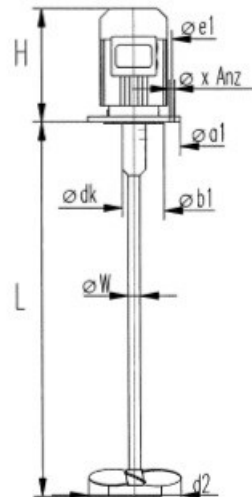
Dimensions:
 Height of agitator H approx.: 280 mm
 Total length L x w: 1700 x 25 mm
 1 coupling dk: 50 mm
 1 Marine propeller, d2: 200 mm
 3-bl.

Mounted at the end of the shaft, with stabilising ring

Material / Surface finish of wetted parts:
 Stainless steel 1.4571 (316 Ti)

Agitator connection:
 Drive flange
 a1 = 200 mm, e1 = 165 mm, b1 = 130 mm
 4 holes of diameter 12 mm

Shaft seal:
 none



Remarks:

Colour: RAL 5003 (sapphire-blue), total layer thickness at least 60 µm
 Weight: approx. 24 kg
 Bending moment: 58 Nm Torque: 8 Nm Axial force: 235 N
 Critical speed: 259 rpm
 Fixing elements and gasket for the fixation on the vessel not included.

FLUID Misch- und Dispergiertechnik GmbH • D-79541 Lörrach • Tel.: + 49/07621/5809-0 • Fax: + 49/07621/5809-16

Příloha č. 1 – Katalogový list míchadla