



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

# CFD MODELOVÁNÍ POČÁTEČNÍ FÁZE ZANÁŠENÍ KONVEKTIVNÍ ČÁSTI SPALOVACÍHO ZAŘÍZENÍ

CFD MODELLING OF THE INITIAL PHASE OF FOULING INSIDE CONVECTIVE SECTION OF A COMBUSTION FACILITY

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Filip Zlámal**

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Jiří Strouhal**

**BRNO 2023**

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	<b>Bc. Filip Zlámal</b>
Studijní program:	Procesní inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jiří Strouhal</b>
Akademický rok:	2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## CFD modelování počáteční fáze zanášení konvektivní části spalovacího zařízení

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Spalování nových typů tuhých paliv a jejich směsí je úzce spojeno s řešením problému zanášení teplosměnných ploch. To je třeba zohlednit při výběru palivových mixů, provozních podmínek a také při návrhu spalovacích zařízení. Výpočtová dynamika tekutin umožňuje modelovat dílčí mechanismy zanášení a jejich interakce. Nabízí tak možnost získat informace o intenzitě zanášení pro nové typy paliv, omezit rozsah experimentálních zkoušek a v porovnání s nimi lépe porozumět příčinám a průběhu zanášení. Vzhledem ke komplexitě problému je práce úžeji zaměřena na simulace počáteční fáze tvorby nánosu, kdy ještě nedochází k podstatné změně geometrie teplosměnných ploch. Výstupy práce tak poskytnou základ pro simulace časového vývoje nánosu a jeho dlouhodobého vlivu na funkci spalovacího zařízení.

### Cíle diplomové práce:

- 1) Rešerše dostupných technik modelování vzniku partikulárního nánosu na teplosměnných plochách spalovacích zařízení.
- 2) Popis modelovaného zařízení.
- 3) Popis vybraných výpočtových modelů dílčích jevů zanášení a jejich implementace v programu ANSYS Fluent.
- 4) Příprava geometrie pro CFD výpočty, nastavení okrajových podmínek a řešiče.
- 5) Simulace počáteční fáze zanášení části teplosměnné plochy.
- 6) Interpretace obdržných výsledků s ohledem na možnosti dlouhodobé predikce vývoje nánosu.

### Seznam doporučené literatury:

KLEINHANS, Ulrich, Christoph WIELAND, Flemming J. FRANDSEN a Hartmut SPLIETHOFF. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior. Progress in Energy and Combustion Science. 2018, 68, 65-168. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2018.02.001

WACŁAWIAK, Krzysztof a Sylwester KALISZ. A practical numerical approach for prediction of particulate fouling in PC boilers. Fuel. 2012, 97, 38-48. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2012.02.007

LEE, Byeong E., Clive A.J. FLETCHER a Soon B. KWON. Computational study of fouling deposit due to surface-coated particles in coal-fired power utility boilers. Fuel. 2002, 81(15), 2001-2008. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/S0016-2361(02)00127-8

KÆR, Søren Knudsen. Numerical investigation of ash deposition in straw-fired boilers: using CFD as the framework for slagging and fouling predictions: Ph.D. thesis. Aalborg, 2001, 203 s. ISBN 978-87-89179-39-1. Ph.D. Thesis. Aalborg University, Institute of Energy Technology.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Cílem této práce bylo vytvořit, na základě poznatků získaných z rešerše, CFD simulaci prvotní fáze zanášení tuhými částicemi při spalování tuhých paliv. V úvodu práce jsou shrnuty mechanismy zanášení tuhými částicemi. Dále jsou popsány přístupy k modelování dopadu a usazování částic. Je sestaven model, který je implementován v softwaru ANSYS Fluent s doplněním o uživatelsky definované funkce. Model je otestován na modelu konvektivní části experimentálního zařízení na spalování tuhých paliv.

### **Klíčová slova**

tuhé částice, výpočtová dynamika tekutin, spalování tuhých paliv, zanášení, depoziční rychlost

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis was to create, based on the knowledge obtained from research, a CFD simulation of initial phase of fouling of solid particles during the combustion of solid fuels. The introduction of the work summarizes the mechanisms of fouling by solid particles. The introduction of the work summarizes the mechanisms of fouling by solid particles. Approaches to modelling the impact and deposition of particles are also described. A model is built, which is implemented in the ANSYS Fluent software with the addition of user-defined functions. The model is tested on a model of the convective part of an experimental device for burning solid fuels.

### **Keywords**

solid particles, computational fluid dynamics, combustion of solid fuels, fouling, deposition velocity

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ZLÁMAL, Filip. *CFD modelování počáteční fáze zanášení konvektivní části spalovacího zařízení* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-26]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145923>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního inženýrství. Vedoucí práce Jiří Strouhal.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *CFD modelování počáteční fáze zanášení konvektivní části spalovacího zařízení* vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

---

Datum

---

*Jméno a příjmení*

## Poděkování

Tímto bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Jiřímu Strouhalovi za odborné vedení, cenné rady a ochotný přístup během zpracování této práce.

## Obsah

1	Úvod.....	14
2	Zanášení tuhými znečišťujícími látkami.....	15
2.1	Popis procesu.....	15
2.2	Důsledky zanášení.....	15
2.2.1	Ovlivnění přestupu tepla.....	15
2.2.2	Koroze.....	16
2.2.3	Eroze.....	16
2.3	Tvorba popílku.....	16
2.4	Přístupy k predikci zanášení.....	17
2.4.1	Empirický přístup.....	17
2.4.2	Mechanistický přístup.....	18
3	Mechanismy zanášení.....	19
3.1	Režimy usazování.....	19
3.2	Transportní mechanismy.....	20
3.2.1	Setrvačnost částic.....	20
3.2.2	Aerodynamický odpor.....	20
3.2.3	Termoforéza.....	21
3.3	Kondenzace.....	22
3.4	Chemické reakce.....	22
3.5	Vliv turbulentních vírů.....	23
3.6	Ostatní mechanismy.....	23
4	Modelování dopadu a ulpívání částic.....	25
4.1	Modely ulpívání.....	25
4.1.1	Viskózní modely.....	25
4.1.2	Modely roztaveného podílu.....	25
4.1.3	Modely kritické rychlosti.....	26
4.2	Přístup depoziční rychlosti.....	27
4.3	Modelování vlivu přítomnosti nánosu na usazování.....	28
4.4	Eroze/odstranění vzniklého nánosu.....	29
4.5	Vlastnosti částic.....	29
4.5.1	Rozložení velikostí.....	30
5	Použitý model a jeho implementace.....	31



5.1	Model proudění spalin .....	31
5.2	Modely transportu a usazování částic.....	32
5.2.1	Částice o velikosti 0,2 $\mu\text{m}$ .....	32
5.2.2	Částice o velikosti 20 $\mu\text{m}$ .....	34
5.3	Implementace v prostředí ANSYS Fluent .....	35
5.3.1	Model proudění .....	35
5.3.2	Model částic s průměrem 20 $\mu\text{m}$ .....	35
5.3.3	Model částic s průměrem 0,2 $\mu\text{m}$ .....	36
6	Modelový případ .....	37
6.1	Geometrie .....	37
6.2	Výpočtová síť .....	38
6.2.1	Výpočtová síť usazovací komory .....	39
6.2.2	Výpočtová síť výměníku tepla .....	40
6.3	Vlastnosti spalin a tuhých částic.....	40
6.3.1	Vlastnosti spalin .....	40
6.3.2	Vlastnosti tuhých částic.....	41
6.4	Okrajové podmínky usazovací komory .....	42
6.4.1	Okrajové podmínky vstupu spalin – usazovací komora.....	42
6.4.2	Okrajové podmínky pro tuhé částice – usazovací komora.....	42
6.4.3	Okrajové podmínky stěn usazovací komory .....	43
6.5	Okrajové podmínky výměníku tepla .....	43
6.5.1	Vstup spalin.....	43
6.5.2	Tuhé částice.....	43
6.5.3	Okrajové podmínky na stěnách výměníku tepla .....	43
7	Výsledky a diskuse.....	45
7.1	Zanášení v usazovací komoře.....	45
7.1.1	Zanášení částicemi o průměru 0,2 $\mu\text{m}$ .....	45
7.1.2	Zanášení částicemi o průměru 20 $\mu\text{m}$ .....	48
7.2	Zanášení ve výměníku tepla .....	49
7.2.1	Zanášení částicemi o průměru 0,2 $\mu\text{m}$ .....	49
7.2.2	Zanášení částicemi o průměru 20 $\mu\text{m}$ .....	51
8	Závěr.....	56
	POUŽITÁ LITERATURA.....	57

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	62
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	66
SEZNAM TABULEK.....	68

# 1 Úvod

V zařízeních na spalování tuhých paliv a jejich směsí je velkým problémem zanášení teplosměnných ploch znečišťujícími látkami obsaženými ve spalinách. To může způsobit pokles přenášeného tepelného výkonu, mechanická a tepelná poškození či nárůst tlakové ztráty [1]. Zanášení je komplexní jev, který je ovlivněn mnoha faktory jako je uvolňování a přeměna anorganických materiálů obsažených v palivu, distribuce velikosti znečišťujících částic, jejich fyzikální vlastnosti, mechanismy transportu částic turbulentním prouděním spalin, vlastnosti materiálu teplosměnných ploch nebo již vzniklého nánosů [2].

S rychlým rozvojem výpočtové dynamiky tekutin (CFD) je možné modelovat dílčí mechanismy zanášení a jejich interakce. Díky tomu je možné omezit experimentální zkoušky a tím i čas a finance. Vzniklo tak mnoho modelů založených na experimentálních datech předpovídající zanášení při spalování tuhých paliv jako uhlí [3], biomasa [4], jejich kombinace [5].

Model počáteční fáze zanášení konvektivní části zařízení na spalování tuhých paliv předpovídá intenzitu zanášení mikronovými a sub-mikronovými částicemi. Jsou uvažovány transportní mechanismy jako setrvačné síly, termoforéza, turbulentní víry. Výsledky mohou posloužit jako základ pro simulaci časového vývoje zanášení.

## 2 Zanášení tuhými znečišťujícími látkami

V následující kapitole je popsán proces zanášení tuhými částicemi vzniklými spalováním tuhých paliv, jejich vliv na spalovací zařízení, dále tvorba znečišťujících částic a přístupy k predikci zanášení.

### 2.1 Popis procesu

Při spalování tuhých paliv dochází k zanášení tuhými částicemi v oblastech s nízkou teplotou a rychlostí proudění, např. v ekonomizéru. Spalováním tuhých paliv (uhlí, biomasa atd.) vzniká popílek, který odchází se spalinami. Částice popílku, jež jsou proudem dopraveny do blízkosti stěny, mohou dopadnout na její povrch, přičemž konkrétní mechanismy tohoto dopadu závisí na lokálních podmínkách i na velikosti a vlastnostech částic. Pokud tuhé částice po dopadu na teplosměnnou plochu ulpí, začnou tvořit nános, který postupně narůstá [2].

Počáteční vrstva nánosů se často skládá z jemných částic (průměr menší než 1  $\mu\text{m}$ ), případně ze zkondenzovaných anorganických par. Po počáteční fázi růstu nánosů začne docházet k usazování hrubší frakce částic (průměr více než  $>1 \mu\text{m}$ ), ulpívající na vzniklé lepivé podkladové vrstvě. Nános vznikající v oblastech s nižší teplotou vykazuje typicky suchou a práškovou strukturu s vysokou pórovitostí. Práce [6] uvádí následující hlavní mechanismy způsobující vznik počáteční vrstvy nánosů:

- adheze mezi jemnými částicemi popílku a teplosměnnou plochou,
- drsnost povrchu teplosměnné plochy v důsledku růstu oxidů,
- kapalná fáze na povrchu teplosměnné plochy,
- termoforéza,
- kondenzace.

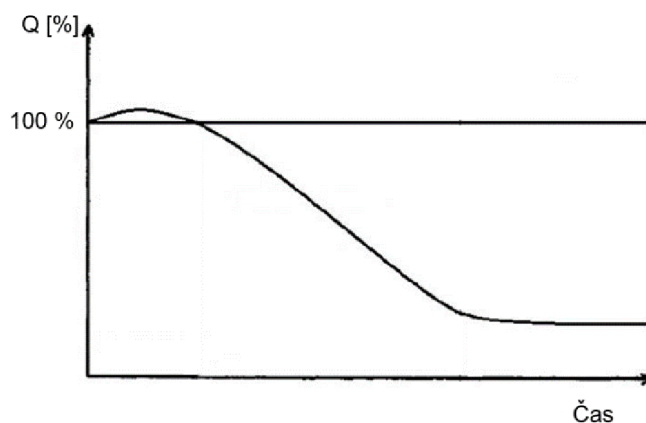
### 2.2 Důsledky zanášení

Vzniklý nános představuje dodatečný tepelný odpor k tepelnému odporu samotné zanášené stěny, což vede ke snížení přenášeného tepelného výkonu. Kromě toho zanášení způsobuje zvyšování tlakových ztrát. Při dosažení neefektivního tepelného výkonu nebo limitních hodnot tlakových ztrát se provádí čištění zařízení, což zvyšuje náklady [1].

#### 2.2.1 Ovlivnění přestupu tepla

Teplo se nejdříve přenáší ze spalin na povrch nánosů (pokud již na teplosměnné trubce nános existuje) radiací a konvekcí, poté je teplo vedeno vrstvou nánosů a stěnou trubky. Nakonec je teplo přeneseno konvekcí do chladícího média.

Konvekce je ovlivněna velikostí, strukturou a složením nánosů, charakteristikami proudění a geometrií teplosměnné plochy. Nános nejen, že zvyšuje tloušťku vrstvy materiálu oddělující spalinu od ohřivaného média, ale zejména v případě partikulárních nánosů díky své porézní struktuře má výrazné tepelně-izolační vlastnosti [7]. Zanášení se zprvu projevuje pozitivně, jelikož vznikající vrstva nánosů při dostatečně malé tloušťce nejprve díky drsnosti povrchu zintenzivňuje přenos tepla v mezní vrstvě a zvyšuje tak přenášený tepelný výkon na dané ploše. Po vytvoření nánosů o jisté tloušťce začne převažovat vliv tepelného odporu nánosů a přenášený výkon začne klesat, viz Obr. 1.



Obr. 1 – Změna tepelného výkonu vzhledem k nárůstu nánosu v čase.

Přenos tepla radiací je rovněž přítomností nánosu ovlivněn, jelikož nános má jiné emisní a absorpční vlastnosti v porovnání s čistou stěnou [7]. S rostoucí velikostí částic nánosu roste emisivita, zatímco malé částice typicky vytvářejí světlejší nános a absorbovaný výkon je tak nižší [8].

### 2.2.2 Koroze

Nános představuje prostředí s vyšší mírou výskytu koroze. V oblastech s nízkou teplotou dochází k tzv. nízkoteplotní korozi. Ta vzniká kvůli síře v palivu, tvořící kyseliny. Při srážení těchto kyselin na teplosměnných plochách se v okolí snižuje teplota proudu spalin. Pokud teplota spalin klesne pod 200 °C, dojde ke korozi [9].

### 2.2.3 Eroze

Jedná se o poškození, kdy dopadající částice popílku deformují či odebírají část materiálu původní stěny. V kotlích na uhlí to jsou typicky křemenné částice s vysokou teplotou tání. Hlavní vlastnosti jsou tvrdost částice, její tvar, průměr, rychlost a úhel dopadu [2]. Jelikož je eroze přímo úměrná rychlosti proudu spalin, je možné ji omezit snížením rychlosti spalin, což ale vede ke větší velikosti zařízení. Pokud částice dopadnou kolmo na stěnu, je eroze zanedbatelná, zatímco při dopadu pod sklonem 20 až 30° je vliv eroze největší [9].

## 2.3 Tvorba popílku

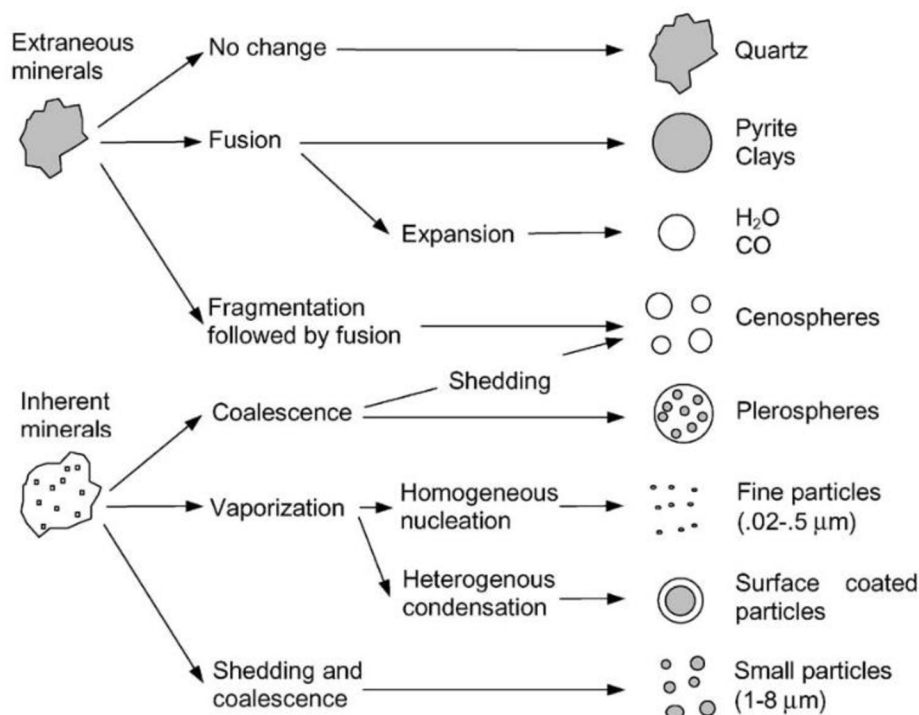
Průběh tvorby popílku určuje jeho vlastnosti a tím tendenci k usazování. Zahrnuje řadu mechanismů a procesů, vedoucích ke vzniku plynných, kapalných (ve formě tavenin nebo kondenzátu) a pevných látek. Tři hlavní aspekty ovlivňující vlastnosti popílku jsou:

- distribuce anorganických složek v palivové matici,
- fyzikální přeměna anorganických složek, např. tání, fúze, odpařování a fragmentace,
- termický rozklad anorganických složek.

Poslední aspekt závisí zejména na teplotě a složení spalin. Tento proces je často označován jako chemická nebo minerální přeměna [2].

K tvorbě popílku dochází spolu s odstraněním těkavých látek, přeměnou zuhelnatělého materiálu a následným chlazením spalin. Značné množství anorganických složek se může

odpařit v závislosti na palivu. Zejména organicky asociované anorganické sloučeniny jsou uvolňovány v podobě par během devolatilizace a hoření tuhé hořlaviny [2].



Obr. 2 – Tvorba popílku při spalování [10].

## 2.4 Přístupy k predikci zanášení

Bylo učiněno mnoho pokusů porozumět mechanismům usazování popílku a predikovat usazování během spalování. To vedlo k metodám pro predikci usazování popílku od nejjednodušších empirických indexů až po pokročilé mechanistické modely. Některé z pokročilých modelů se také zabývají mechanikou tekutin, termodynamikou proudění a spalovacích procesů, což jsou důležité parametry ovlivňující proces usazování. Komplexní modelování těchto mechanismů lze provést pomocí výpočtové dynamiky tekutin (CFD) [11].

### 2.4.1 Empirický přístup

K predikci tvorby nánosu různými palivy bylo vyvinuto mnoho empirických indexů. Typicky jsou tyto indexy určeny na základě chemického složení popílku nebo paliva. Patří sem např. index zanášení, struskování, erozivní index, teplota tání popílku, obsah alkálií v uhlí a další. Tyto indexy byly vyvinuty pro spalování uhlí a později byly modifikovány i pro spalování biomasy [12]. Omezeně lze pak tyto indexy využít pro tuhá alternativní paliva, např. směsný komunální odpad – u podobných (vícesložkových) paliv je však použití ukazatelů (často stanovených pro individuální složky) dále komplikováno vzájemnou interakcí složek [13].

Oxidy v popílku lze rozdělit na kyselinotvorné „A“ ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ) a zásadotvorné „B“ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ). Potenciál usazování částic popílku může být vyhodnocen z hlediska poměru zásadotvorných ku kyselinotvorným oxidům, tzv. B/A poměr. Pomocí tohoto poměru lze určit index zanášení  $R_f$ , který udává tendenci k zanášení [14]. Tento poměr byl určen pro spalování uhlí, při spalování biomasy k zanášení nejvíce přispívají sloučeniny alkalických kovů. Zejména sodík a draslík vyskytující se ve spalinách z biomasy v podobě

oxidů  $\text{Na}_2\text{O}$  a  $\text{K}_2\text{O}$  mohou přispívat k tvorbě anorganických fází, které mají nízkou teplotu tání [15]. Může poté dojít k roztavení těchto fází na teplosměnných plochách, čímž se vytvoří vrstva přispívající k zanášení. Proto byly určeny korelace. Index zanášení při spalování biomasy se spočítá dle rovnice [14]:

$$R_f = \frac{B}{A} \cdot (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) \quad (1)$$

## 2.4.2 Mechanistický přístup

U tohoto přístupu jsou nejprve analyzovány jednotlivé dílčí procesy. Jejich matematický popis je posléze implementován do komplexních matematických modelů [16]. Autoři [4] vytvořili dynamický mechanistický model usazování popílku a jeho uvolňování povrchovým tavením.

Komplexní modely kombinující informace o jednotlivých dílčích procesech jsou běžně implementovány prostřednictvím Výpočtové dynamiky tekutin (CFD). Náročnost výpočtů lze snížit zavedením zjednodušení jako např. omezením geometrie na 2D řez nebo náhradou rozptýlených částic popílku zástupnou kontinuální fází. Usazování popílku se může predikovat např. pomocí koncentrace částic v blízkosti stěny a konceptu depoziční rychlosti [2].

Příklad zjednodušení modelové geometrie lze najít v práci [17], popisující vývoj modelu a CFD simulaci usazování popílku v kotli na slámu. V tomto kotli bylo téměř 400 vzduchových trysek o relativně malé velikosti, což vedlo k problémům s vytvořením výpočetní sítě. Bylo přistoupeno k zjednodušení kruhové geometrie trysek na čtvercovou o stejné ploše a nahrazení trubkovic blokovými strukturami, čímž se vyloučila možnost přímé simulace zanášení částic. Proto byla predikce zanášení stanovena pomocí korelace mezi účinností dopadu  $\eta_{imp}$  a Stokesovým číslem  $St$ . Účinnost dopadu se stanoví jako množství částic dopadajících na povrch  $N_{imp}$  ku celkovému množství částic  $N_{tot}$  mířícím k povrchu.

$$\eta_{imp} = \frac{N_{imp}}{N_{tot}} \quad (2)$$

Dále byly mechanismy zanášení závisující na mezní vrstvě řešeny pomocí korelací na základě depozičních rychlostí [11]. Při omezení pouze na dílčí části zařízení lze již detailně simulovat pohyb částic až do okamžiku jejich dopadu bez přílišného nárůstu výpočtových nároků. Autoři [3] prezentují model tvorby usazenin na stěnách deskového přehříváku. Model vyhodnocoval vliv velikosti částic na tvorbu nánosu a na tvorbu „můstků“. Autoři [18] modelovali příčně periodický svazek čtyř za sebou jdoucích trubek. Vypočetli lokálně rychlost dopadajících částic, účinnost ulpění a rychlost usazování v závislosti na velikosti částic. Sub-mikronové částice vykazovaly mnohem větší účinnost ulpění, zatímco částice s největším průměrem (18,7  $\mu\text{m}$ ) ze sledovaných částic měly mnohem větší dopadové rychlosti.

### 3 Mechanismy zanášení

Zanášení teplosměnných ploch tuhými znečišťujícími látkami se uskutečňuje působením řady transportních mechanismů a následným ulpíváním částic na stěně či už vzniklém nánosu. Mechanismy závisí na velikosti částic, jejich koncentraci, chemickém složení, lokálních podmínkách proudu spalin a vlastnostech zanášeného povrchu [12].

#### 3.1 Režimy usazování

Usazování tuhých částic na teplosměnných plochách či již vzniklém nánosu lze rozdělit do tří režimů. Tyto režimy jsou popsány bezrozměrným relaxačním časem částice  $\tau^+$ , což je doba reakce částice na změnu rychlosti proudění [2]:

$$\tau^+ = \frac{\tau_p \cdot u^{*2}}{\vartheta_g} \quad (3)$$

kde  $u^*$  je třecí rychlost,  $\vartheta_g$  je kinematická viskozita spalin a  $\tau_p$  je relaxační čas částice. Relaxační čas částice se spočítá podle vztahu (4).

$$\tau_p = \frac{\rho_p \cdot d_p^2}{18 \cdot \mu_g} \quad (4)$$

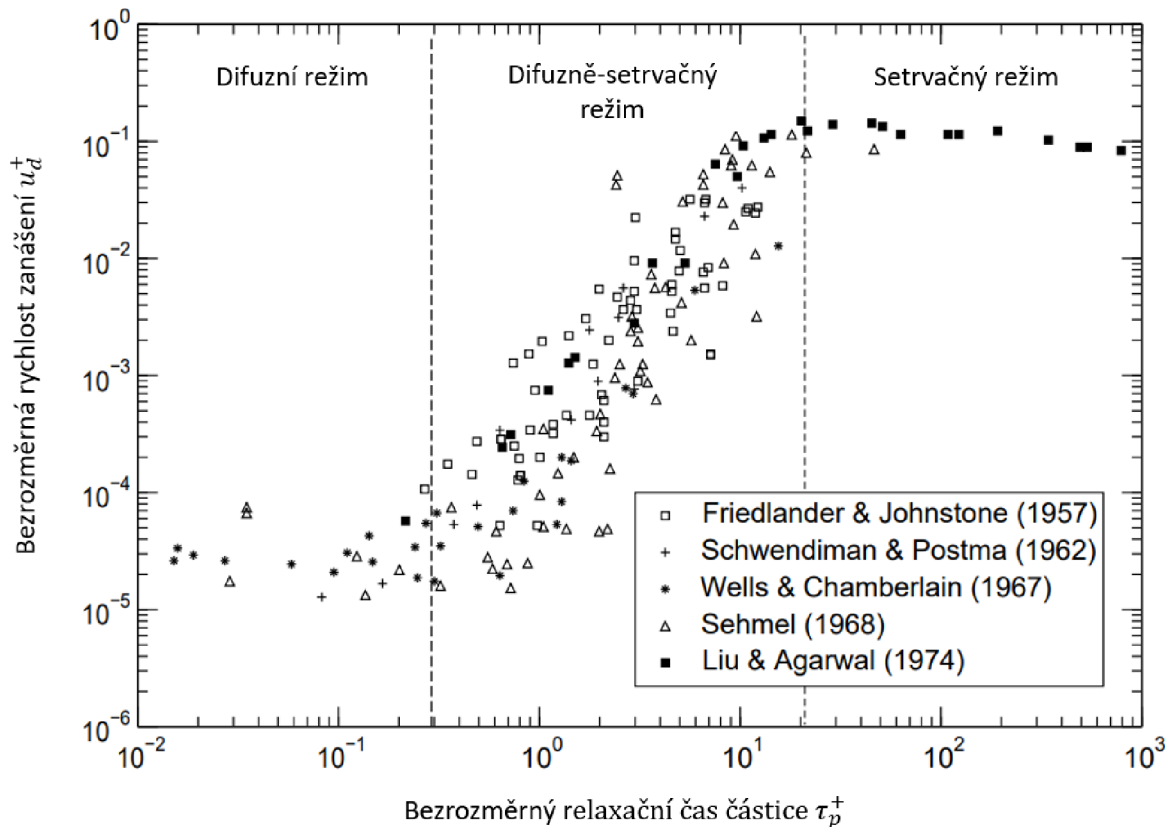
kde  $\rho_p$  je hustota částice,  $d_p$  je průměr částice a  $\mu_g$  je dynamická viskozita spalin. Třecí rychlost je definována pomocí vztahu (5), kde  $\tau_w$  je smykové napětí stěny [2].

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_g}} \quad (5)$$

Podle bezrozměrného relaxačního času částice lze rozlišit tři režimy usazování, viz. Obr. 3:

1. V difuzním režimu dochází k zanášení vlivem turbulentní difuze ze středu trubky a vlivem difuze v mezní vrstvě. Tento režim je typický pro sub-mikronové částice.
2. Druhým režimem je difuzně-setrvačný režim. V této oblasti dominuje interakce částic o významné setrvačnosti s turbulentními víry. Částice v oblasti blízko stěny má dostatečně velkou setrvačnost, aby prošla mezní vrstvou a usadila se na teplosměnné ploše.
3. V setrvačném režimu částice mají tak velkou setrvačnost, že nejsou unášeny turbulentními víry a dostávají se přímo k teplosměnné ploše. Jedná se zejména o velké částice [11].





Obr. 3 – Rozdělení režimů zanášení (převzato z a upraveno [11]).

## 3.2 Transportní mechanismy

Níže uvedené transportní mechanismy se projevují v závislosti na režimu zanášení. Vyjmenovány jsou obecně nejpodstatnější.

### 3.2.1 Setrvačnost částic

Částice se vlivem setrvačných sil odpojují od proudu spalin a dopadají na teplosměnné plochy. Toto platí zejména pro částice s průměrem větším než  $10 \mu\text{m}$ . Vliv setrvačných sil je často označován jako dominantní mechanismus, který způsobuje největší hmotnostní přírůstek v nánosu a který vede k urychlení tvorby nánosu.

### 3.2.2 Aerodynamický odpor

Na částici pohybující se v proudu tekutiny působí odpor. Způsobuje zrychlení částice, která se snaží vyrovnat změny rychlosti okolní tekutiny [19]. Odpor se počítá jako [20]:

$$F_D = \frac{1}{2} \frac{C_D A v^2}{C_C} \quad (6)$$

kde  $A$  je průtočná plocha,  $C_C$  je Stokes-Cunninghamův korekční faktor,  $C_D$  je odporový koeficient a  $v$  je rychlost proudu.

Stokes-Cunninghamův korekční faktor  $C_C$  odpovídá skutečnosti, že pro velmi malé částice, se okolní medium nemůže uvažovat jako kontinuum, ale spíše jako odlišné částice [20]:

$$C_C = 1 + \frac{2 \cdot \lambda}{d_p} \cdot (1,257 + 0,4 \cdot e^{-(1,1 \cdot d_p / 2 \cdot \lambda)}) \quad (7)$$

Pro Reynoldsovo číslo  $Re < 1$ , platí Stokesův zákon a odporový koeficient  $C_D$  se spočítá jako [21]:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \quad (8)$$

kde  $Re_p$  představuje Reynoldsovo číslo částice. Pro Reynoldsova čísla větší než 1 Stokesův zákon podhodnocuje odporový koeficient a může být určen následovně [20]:

$$C_D = \begin{cases} 0,44 & \text{if } Re_p > 1000 \\ \frac{24}{Re_p} \cdot (0,15 \cdot Re_p^{0,687}) & \text{if } Re_p \leq 1000 \end{cases} \quad (9)$$

### 3.2.3 Termoforéza

Termoforéza představuje silové působení na částici v důsledku přítomnosti teplotního gradientu v okolním plynu, případně uvnitř samotné částice. Částice více interaguje s molekulami na straně horkého média, které mají vyšší kinetické energie než molekuly na straně studeného média. Srážky vysokoenergetických molekul tvoří větší sílu než nízkoenergetické molekuly na studené straně média. To způsobí vznik výsledné síly působící v opačném směru vůči teplotnímu gradientu. Při nárůstu nánosu na povrchu trubky klesá teplotní gradient v mezní vrstvě a tím i míra termoforézy [22]. Vliv termoforézy je možné uvažovat u částic s průměrem menším než 10  $\mu\text{m}$  [4]. Obecný vztah pro termoforézni sílu je uveden v [23]:

$$\vec{F}_{th} = -D_{T,p} \cdot \frac{1}{T} \cdot \nabla T \quad (10)$$

kde  $T$  je lokální teplota spalin,  $\nabla T$  je teplotní gradient a  $D_{T,p}$  je termoforézni koeficient, daný vztahem:

$$D_{T,p} = \frac{6 \cdot \pi \cdot d_p \cdot \mu_g^2 \cdot 1,72 \cdot (K + 2,18 \cdot Kn)}{\rho_g \cdot (1 + 3,42 \cdot Kn) \cdot (1 + 2 \cdot K + 4,36 \cdot Kn)} \quad (11)$$

kde  $Kn$  je Knudsenovo číslo,  $\rho_g$  je hustota tekutiny,  $\mu_g$  je dynamická viskozita spalin,  $K$  je poměr tepelné vodivosti spalin a tepelné vodivosti částice.

Tento vztah pro termoforézni koeficient  $D_{T,p}$  byl odvozen pro ideální plyn a kulové částice [23].

Knudsenovo číslo popisuje, zda lze charakteristiky proudění popsat pomocí mechaniky kontinua ( $Kn < 1$ ) nebo metodami statistické mechaniky ( $Kn > 1$ ). Pokud by  $Kn$  dosáhlo hodnot vyšších než 1, Stokesův zákon přestává platit a je potřeba učinit korelace [2], viz kap. 3.2.2.

$K_n$  se spočítá dle vztahu (12).  $\lambda$  označuje střední volnou dráhu tekutiny,  $T_g$  je teplota spalin,  $r$  je měrná plynová konstanta a  $p$  je tlak.

$$Kn = \frac{2 \cdot \lambda}{d_p} \quad (12)$$

$$\lambda = \frac{\mu_g}{p} \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot T_g \cdot r}{2}} \quad (13)$$

### 3.3 Kondenzace

Ke kondenzaci dochází, když se anorganické páry dostanou k blízkosti teplosměnných ploch, které mají nižší teplotu, než proud plynu. Vzniklý kondenzát má velký vliv na tepelnou vodivost, difuzivitu a jiné vlastnosti nánosu, jelikož může zvýšit kontaktní plochu na povrchu a také mezi částicemi [22] Počáteční ulpívání částic na teplosměnné ploše je často způsobeno kondenzací sloučenin alkalických kovů [4].

Ke kondenzaci může dojít třemi způsoby:

1. Páry projdou mezní vrstvou a heterogenně kondenzují na povrchu teplosměnné plochy nebo v pórech nánosu.
2. Dochází k homogenní nukleaci par, které se poté uloží na povrchu.
3. Páry mohou heterogenně kondenzovat na jiných částicích, které posléze dopadnou na povrch.

Nános vytvořený kondenzací je lepkavý a silně ovlivňuje účinnost zachycení částic [22]. Množství a chemické složení anorganických par silně závisí na palivu a teplotě spalin. Kondenzace je významným mechanismem ulpívání u paliv s vysokým obsahem alkalických kovů, jako např. biomasa [2].

S nárůstem nánosu se zvyšuje jeho povrchová teplota a rychlost kondenzace klesá [22]. Rychlost kondenzace je závislá na přenosu hmoty, jehož koeficient přenosu hmoty je určen Sherwoodovým číslem  $S_h$ .

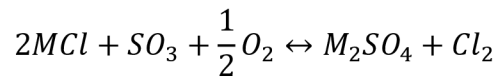
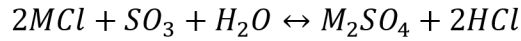
### 3.4 Chemické reakce

Chemické reakce jsou způsobeny heterogenní reakcí mezi nánosem nebo povrchem teplosměnných ploch a složkami plynu. Jsou závislé na teplotě. Mezi nejvýznamnější chemické reakce přispívající k usazování částic patří:

1. oxidace nebo redukce,
2. sulfatace,
3. alkalická absorpce,
4. tvorba eutektik.

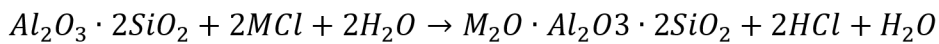
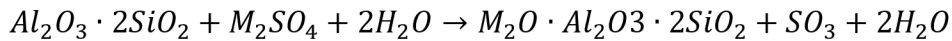
Těmito reakcemi vznikají hydroxidy, sulfáty nebo křemičitany a mění tak vlastnosti a strukturu nánosu [22]. V anorganických reakcích často dominují páry alkalických kovů, např. na částicích nebo na stěnách zařízení [2].

Sulfatace typicky probíhá u sloučenin Na, K, Ca, Mg a Zn, a to podle reakcí



kde  $M$  představuje jeden z výše jmenovaných prvků. Tyto reakce uvolňují sloučeniny chloru, které mohou napadnout teplosměnnou plochu a způsobit korozi [2].

Alkalická absorpce v nánosu je způsobena především hlinitokřemičitany a jejich schopností absorbovat sírany a chloridy alkalických kovů [2]:



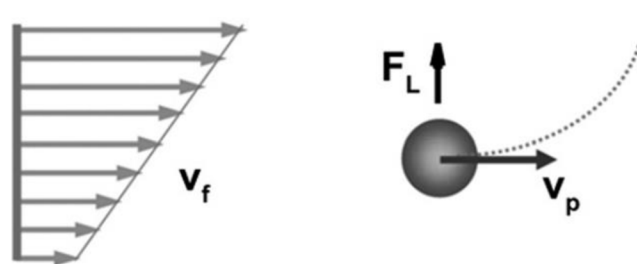
### 3.5 Vliv turbulentních vírů

Turbulentní víry v okolí teplosměnných ploch zrychlují částice, které jsou poté schopny opustit víry díky vlastní setrvačnosti a dopadají na teplosměnnou plochu [2]. Turbulentní víření je významné hlavně pro malé částice ( $d_p < 10 \mu m$ ). Víry mohou dostat částice k zadní straně teplosměnné trubky a tvořit zde nános, zejména v místech s nízkou teplotou, kde zároveň narůstá rychlost proudu [12]. O tomto mechanismu se ví velmi málo a je popisován převážně empirickými koeficienty [11].

### 3.6 Ostatní mechanismy

Tyto mechanismy vedou k silovým působením na částice, mění dopadovou účinnost, a tím mohou ovlivnit tvorbu nánosu [2]. Tyto mechanismy jsou často zanedbávány, jelikož ve většině případů mají malý vliv na pohyb částic. Také jsou často popisovány empiricky [12]. Jevy jako vliv tlakového gradientu nebo virtuální hmotnosti částice lze pro velmi vysoký poměr (více než 10) hustoty částice popílku a hustoty spalin zanedbat [23].

Saffmanův vztlak vzniká vlivem rychlostního gradientu v rychlostním profilu tekutiny. Vzniká tak boční vztlaková síla působící na částici [24].  $k$  je empirická konstanta o hodnotě 2,594 a  $d$  je tenzor deformace,  $\vartheta_g$  je kinematická viskozita,  $\vec{u}$  je rychlost fáze tekutiny a  $\vec{u}_p$  je rychlost částice. Vztah platí pro sub-mikronové částice a nízká Reynoldsova čísla částice [23].

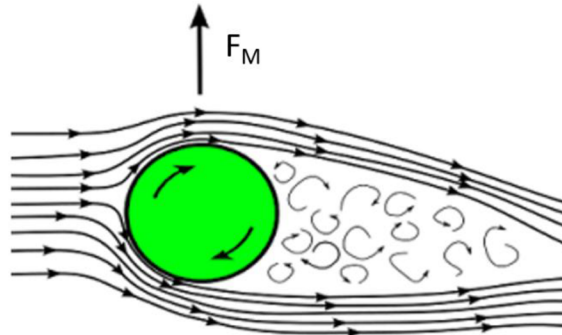


Obr. 4 – Saffmanův vztlak [24].

Saffmanův vztlak lze určit ze vztahu:

$$\vec{F}_L = m_p \frac{2 k \vartheta_g^{0.5} \rho_g d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{lk} d_{kl})^{0.25}} (\vec{u} - \vec{u}_p) \quad (14)$$

V případě, kdy částice při pohybu vůči tekutině rotuje kolem osy kolmé na směr pohybu v proudu, působí na ni vztlaková síla, viz **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Při nízkých  $Re$  dochází ke strhávání tekutiny v důsledku rotace částice. Tím se rychlost částice na jedné straně zvyšuje, zatímco na druhé straně se snižuje. Vzniká vztlaková síla působící z místa s nižší rychlostí do místa s vyšší rychlostí [25].



Obr. 5 – Magnusův jev [26].

Velikost Magnusovy síly lze určit ze vztahu [23]:

$$\vec{F}_M = \frac{1}{2} A_p C_{RL} \rho_g |\vec{V}| |\vec{\Omega}| (\vec{V} \times \vec{\Omega})$$

kde  $A_p$  je plocha povrchu částice,  $C_{RL}$  je rotační součinitel vztlaku,  $\vec{\Omega}$  je relativní úhlová rychlost kapalina-částice,  $\vec{V}$  je relativní rychlost tekutina-částice.

Brownův pohyb se stává významným, pokud nedochází k termoforéze a to pouze u částic s průměrem roven  $0,1 \mu\text{m}$  a méně [12]. K turboforéze dochází, pokud se při nehomogenní turbulenci objeví gradient v turbulentní kolísající rychlosti [12]. K elektroforéze dochází, působením elektrostatické a Van der Waalovy síly mezi povrchy a okolními částicemi na malé částice ( $d_p < 0,1 \mu\text{m}$ ) [12].

## 4 Modelování dopadu a ulpívání částic

### 4.1 Modely ulpívání

Ulpívání částic na teplosměnné ploše závisí na fyzikálních vlastnostech plochy (např. drsnost, teplota) a také na vlastnostech dopadající částice (chemické složení, teplota, mineralogické složení, struktura). Další významné faktory ovlivňující pravděpodobnost ulpění jsou rychlost částice při dopadu, úhel dopadu, uspořádání trubek ve výměníku tepla. [12].

Pravděpodobnost ulpění  $P_{stick}$  uvádí míru schopnosti částice ulpět na ploše po dopadu. Podle toho, které vlastnosti a veličiny uvažujeme při stanovení toho, zda částice při dopadu ulpí na povrchu stěny či nánosu, rozlišujeme následující tři základní skupiny modelů ulpívání.

#### 4.1.1 Viskózní modely

Pravděpodobnost ulpění částic popílku je určena viskozitou dopadajících částic  $\mu_p$  na teplosměnnou plochu. Viskozita je funkcí chemického složení a teploty dopadajících částic. Viskozita částic se porovná s tzv. kritickou viskozitou  $\mu_{kr}$ . Pokud je viskozita částice menší než kritická viskozita, předpokládá se, že částice při kontaktu s teplosměnnou plochou na ploše ulpí [12]. Nevýhodou tohoto modelu je značný rozptyl v empiricky stanovených hodnotách kritické viskozity. Např. [27] pozoroval, že pro částice popílku bohatého na železo je  $\mu_{kr} = 8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , zatímco [28] předpokládal  $\mu_{kr}=10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  pro spalování práškového uhlí.

Kromě kritické viskozity se používá také referenční viskozita  $\mu_{ref}$ . Pokud je viskozita částic větší, než viskozita referenční, částice se považují za částečně ulpívající a pravděpodobnost ulpění je spočítána jako:

$$P_{stick} = \frac{\mu_{ref}}{\mu_p} \quad (15)$$

Pokud je viskozita částic menší nebo rovna referenční viskozitě, předpokládá se, že částice ulpí na povrchu teplosměnné plochy [27].

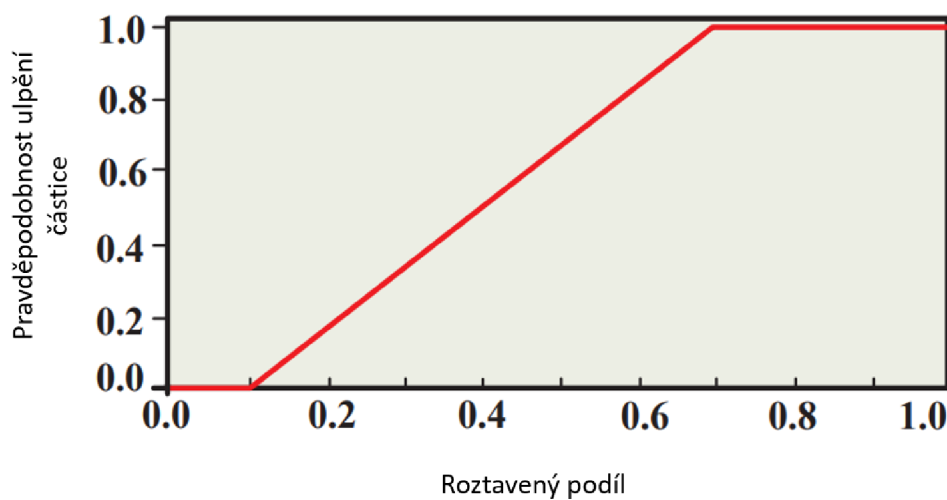
V práci [29] bylo zvoleno kritérium ulpívání částic založené na referenční viskozitě. V práci se také objevuje výraz „kritická rychlost“, která ovšem nesouvisí s modely kritické rychlosti, viz 4.1.3. Kritickou rychlost autoři [29] používají k posouzení, zda částice projde mezní vrstvou. Předpokládají, že částice s rychlostí větší, než kritickou jsou schopny projít mezní vrstvou a dopadnout na teplosměnnou plochu. Částice, které mají rychlost menší, než kritickou jsou považovány za zachycené mezní vrstvou a unášeny k výstupu. Když částice projdou mezní vrstvou využije se referenční viskozity k určení, zda částice ulpí na teplosměnné ploše. Autoři [30] zvolili velikost referenční viskozity jako  $10^5 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . Model použili k predikci zanášení v poloprovodním zkušebním zařízení pro tři druhy uhlí. Výsledky byly v dobré shodě s pozorováním [29].

#### 4.1.2 Modely roztaveného podílu

Za vysokých teplot dochází k roztavení částic popílku. Tím vzniká kapalná fáze, která zvyšuje pravděpodobnost ulpění částic. Proto byly vytvořeny modely na základě roztaveného podílu částic (množství roztavených částic k množství částic) [12]. Oproti čistým látkám, které tají při určité teplotě, vícesložkové systémy mohou tát v širším teplotním rozsahu. Často se pro

vícesložkové systémy provádí výpočty termodynamické rovnováhy pro určení roztaveného podílu na základě teploty a složení [2]. [4] vyvinuli dynamický matematický model růstu a oddělování nánosu popílku vlivem tavení na horizontální chlazené sondě v roštovém kotli na slámu. Předpokládali, že pravděpodobnost ulpění částice  $P_{stick}$  je závislá na hmotnostním podílu kapalně fáze  $f$ . Definovali částice jako lepkavé, pokud byl jejich roztavený podíl  $f \geq 10\%$ . Nad touto hodnotou se pravděpodobnost ulpění částice lineárně zvyšuje. Při roztaveném podílu částice nad 70 % je  $P_{stick} = 1$  [4]. Tato závislost je zobrazena na Obr. 6.

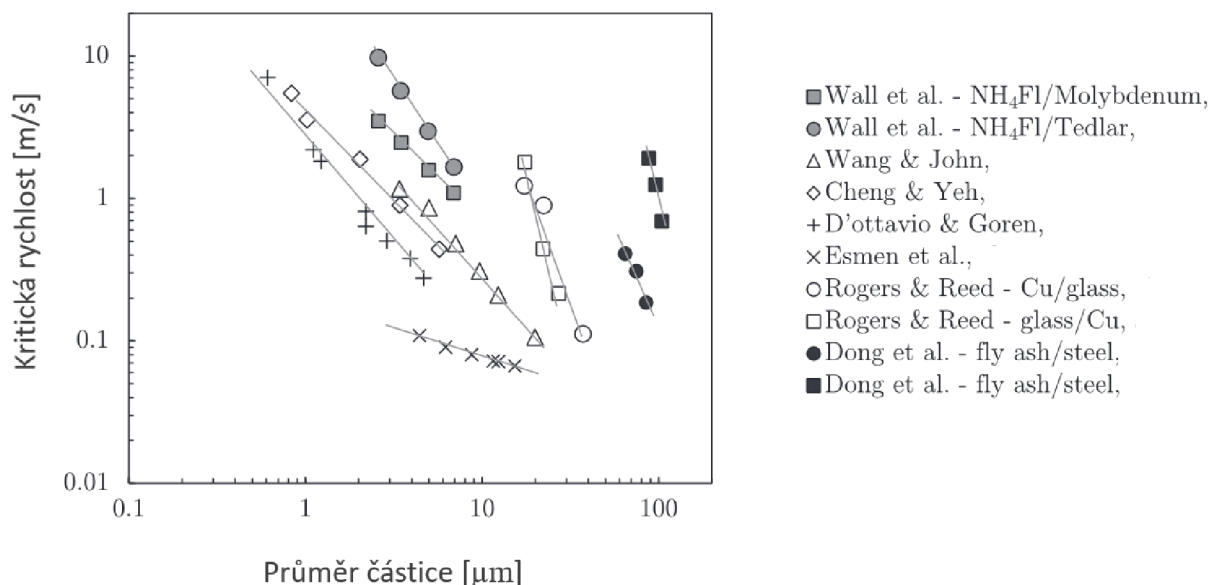
$$P_{stick} \begin{cases} 0 & f = 0 - 0,1 \\ 1,67 \cdot f - 0,167 & f = 0,1 - 0,7 \\ 1 & f = 0,7 - 1 \end{cases} \quad (16)$$



Obr. 6 – Závislost pravděpodobnosti ulpění částice na roztaveném podílu [12].

### 4.1.3 Modely kritické rychlosti

Tyto modely jsou založeny na energetické nebo silové bilanci částice během dopadu na teplosměnnou plochu. V případě tuhých částic zahrnuje dopad elastickou deformaci a v závislosti na kinetické energii částice a vlastnostech materiálu jak plochy, tak i částice také plastickou deformaci. Z energetické bilance jsou vypočteny kritické parametry, nejčastěji kritická rychlost  $v_{kr}$ . Pokud má částice dopadovou rychlost menší než kritickou, tak částice po dopadu ulpí na teplosměnné ploše [2]. Kritická rychlost je různými autory určována různě [31], [32], [33]. Wall a spol. porovnali údaje z literatury o kritické rychlosti při které částice ulpí na povrchu. Velikost částice silně ovlivňuje kritickou rychlost. Jak lze vidět na Obr. 7, kritická rychlost klesá s rostoucím průměrem částice ve všech případech [34].



Obr. 7 – Závislost kritické rychlosti na velikosti částice (převzato z [34] a upraveno).

Autoři práce [10] se zabývali zanášením částic pokrytých viskózní vrstvou zkondenzovaných par na povrchu částic i již vzniklého nánosu. Viskózní vrstva na povrchu částice ale snižuje při dopadu rychlost částice ještě před dopadem tuhého jádra částice na pevný povrch stěny či nánosu. Autoři uvažují zkondenzovanou vrstvu tvořenou primárně  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Pravděpodobnost ulpění částice je stanovena pomocí modelu kritické rychlosti, mezi jehož vstupní parametry patří i aktuální tloušťka vrstvy kondenzátu na povrchu částice [10].

Autoři [35] rozšířili kritérium kritické rychlosti o kritický úhel dopadu  $\theta_{kr}$ . Pokud bude úhel dopadu částice větší než  $\theta_{kr}$ , částice se odrazí, i když splňuje podmínku ulpění pro kritickou rychlost. Kritický úhel dopadu závisí na materiálových vlastnostech částice a dopadové plochy [35]. [36] určil kritický úhel dopadu na základě energetické rovnováhy mezi kinetickou energií tečné složky pohybu částice a minimální energií potřebnou k odtržení částice od povrchu.

$$\tan \theta_{kr} = \frac{v_t}{v_n} = \sqrt{\frac{E_t}{E_n}} = \frac{\mu^*}{(32 \cdot \beta^3)^{1/2}} \sqrt{\frac{E^*}{G^*}} \quad (17)$$

$v_t$  a  $v_n$  jsou tečná a normální složky rychlosti částice při dopadu,  $E_t$  je kinetická energie tečné složky pohybu bezprostředně před dopadem,  $E_n$  je normálová adhezní energie, která musí být překonána,  $\mu^*$  značí efektivní součinitel tření,  $\beta$  je efektivní koeficient kontaktního poloměru,  $E^*$  a  $G^*$  jsou modul pružnosti v tahu a ve smyku [35].

Význam dopadového úhlu pro ulpívání částic popílku na hladký ocelový povrch zkoumali autoři [37] a stanovili empirickou závislost tečného restitučního koeficientu na normálovém restitučním koeficientu a dopadovém úhlu při zadaném součiniteli dynamického tření mezi povrchy částice a stěny.

## 4.2 Přístup depoziční rychlosti

Není-li možné provést dostatečné zjemnění výpočtové sítě pro simulaci proudění a pohybu částic v těsné blízkosti stěny, lze použít přístup s využitím tzv. depoziční rychlosti  $u_d$ . Ta se určí z bezrozměrné depoziční rychlosti  $u_d^+$  a třecí rychlosti  $u^*$  [38].



$$u_d = u_d^+ \cdot u^* \quad (18)$$

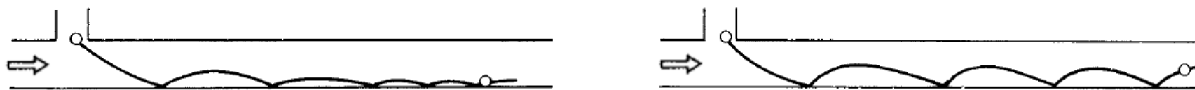
$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_g}} \quad (19)$$

### 4.3 Modelování vlivu přítomnosti nánosu na usazování

Přítomnost partikulárního nánosu vedle např. nárůstu povrchové teploty nebo intenzifikace přenosu hmoty, hybnosti a tepla v mezní vrstvě vede ke změně pravděpodobnosti ulpění dopadajících částic, a to zejména díky

- změně v dopadovém úhlu částice a z toho plynoucí změně ve velikosti ztrát energie částice,
- vícenásobná kolizi částice a povrchu nánosu,
- deformaci nánosu v důsledku vzájemného pohybu jednotlivých usazených částic.

Nerovnosti, resp. drsnost povrchu se projevuje i u nezanesených povrchů a může například bránit částicím v usazování na dně horizontálních potrubí. Částice dopadající pod malým úhlem vzhledem k původnímu hladkému povrchu je vlivem přítomné nerovnosti odražena pod větším úhlem, dostává se tak výše do míst s vyšší rychlostí proudu a před dalším dopadem na stěnu tak získá vyšší rychlost. Tento efekt uvádí autor [39] jako tzv. *abnormal bouncing* a je znázorněný na Obr. 8.



Postupné usazení částice na hladkém povrchu.

Opakované odrazy od nerovností povrchu dna.

Obr. 8 – Znázornění vlivu nerovností povrchu na usazování částic nesených proudem plynu v horizontálním kanálu. Převzato z [39] a upraveno.

Modelování tohoto efektu je provedeno za pomoci tzv. virtuální stěny (*virtual wall*), kdy odraz částice není určován vůči původní „hladké“ stěně v modelové geometrii, ale vůči náhradní rovině, která je vůči původnímu povrchu nakloněna. Tento náklon je v [39] určován na základě empirického vztahu zohledňujícího rozměry kanálu a rychlost proudu plynu.

Podobný přístup využili autoři [40]. Odchylka mezi normálami původní a virtuální stěny je uvažována jako náhodná s normálním rozdělením pravděpodobnosti se střední hodnotou rovnou nule a směrodatnou odchylkou určenou na základě struktury povrchu zjištěné optickým mikroskopem. Toto rozdělení je posléze ještě pro výpočet dopadu částice modifikováno tak, že odchylky, pro které by již virtuální stěna mířila směrem od dopadající částice, měly přiřazenu hustotu pravděpodobnosti rovnou nule a nevyskytovaly se tak záporné dopadové úhly. Tzv. *Rough Wall Model* implementovaný v softwaru ANSYS Fluent využívá pro výpočet směrodatné odchylky tři parametry popisující drsnost povrchu [23].

Možnost vícenásobné kolize částice s povrchem nánosu byla zahrnuta v modelu [41]. Vedle náhodné orientace povrchu, na který částice dopadá, autoři uvažovali až dvě po sobě následující kolize. Dopadový úhel při druhé kolizi je zde určen jako násobek prvního úhlu odrazu. Vliv deformace nánosu při posuvu jednotlivých usazených částic je uvažován v modelu popsáném a experimentálně ověřeném v práci [42]. Povrch lože složených ze slisovaných skleněných kulových částic je zde modelován jako rovinná vrstva pravidelně rozmístěných koulí. Každá z několika možných kolizí dopadající částice s touto vrstvou je pak řešena jako ráz dvou koulí. Hmotnost zasažené částice je ve výpočtu rázu zvýšena pomocí faktoru, jehož experimentálně stanovená hodnota se pohybovala mezi 2,6 a 3,5 v závislosti na poměru velikostí dopadající částice a průměrné velikosti částice v loži/nánosu.

#### 4.4 Eroze/odstranění vzniklého nánosu

Pokud je plocha již zanesená částicemi, může docházet k odstranění vzniklého nánosu/lože vlivem eroze, gravitace, mechanického a tepelného šoku nebo táním částic nánosu navrhli model eroze vysoce alkalické uhlí spalované ve velkokapacitní peci. Model byl založen na ztrátě energie částice při dopadu a povrchové energii nánosu/lože. V autoři navrhli závislý na rychlosti částic v průtokovém reaktoru. Eroze byla způsobena nelepivými částicemi písku. Model porovnával energii dopadu částice a práci adheze nánosu/lože. Model uvažující erozi při nárazu nelepivých částic na nelepivé částice nánosu byl navrhnut v [27]. Autoři [27] stanovili, že intenzita eroze je úměrná toku dopadajících částic, hmotnostnímu toku nelepivých částic a podílu povrchu plochy dopadu, která není lepivá. Empirický model odstranění nánosu byl navrhnut autory [43], kteří se zabývali simulací zanášení složkou biomasy ( $K_2Si_4O_9$ ) v laboratorním průtokovém reaktoru. Model závisel na teplotě, rychlosti dopadu, průměru a úhlu dopadu částice. Autoři [44] modelovali odstranění nánosu pomocí intenzity odstranění nánosu  $\dot{m}_r$ , která se následně odečítala od intenzity usazování částic.  $k_r$  je konstanta odstranění,  $\psi$  je houževnatost nánosu a  $x_f$  je tloušťka nánosu.

$$\dot{m}_r = k_r \cdot \left( \frac{\tau_w}{\psi} \right) \cdot x_f \quad (20)$$

#### 4.5 Vlastnosti částic

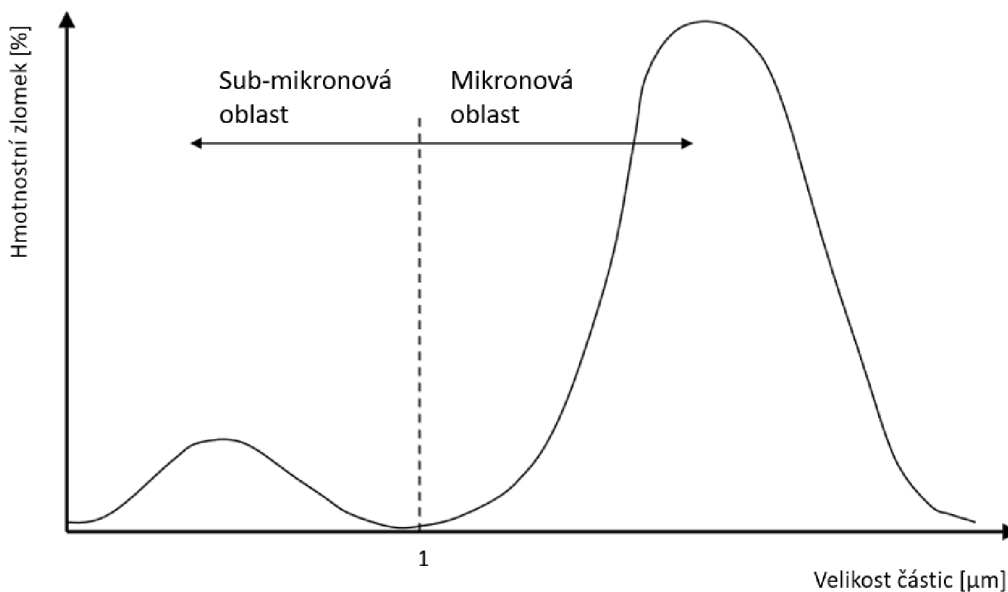
Vlastnosti částic figurují jako vstupní parametry pro modely transportu a ulpívání částic. Vlastnosti částic jsou často určovány analýzou vzorků nánosu, což omezuje jejich použití na podmínky (zejména typ paliva a podmínky spalování) podobné těm, při jakých vznikl analyzovaný vzorek.

Další možností, jak určit vlastnosti částic jsou modely spalování spojené s modely usazování. V [45] autoři navrhli model spalování živičného uhlí. Vzorky uhlí byly analyzovány QEMCAN analýzou a data pak posloužila jako vstupní hodnoty modelu spalování. Model zahrnoval submodely pro transformaci minerálních zrn, jako je koalescence obsažených minerálů a fragmentace vyloučených minerálů. Údaje chemického složení a distribuce velikosti částic popela ze spalovacího modelu byla přidána do modelu usazování. Autoři [46] navrhli vícefázový spalovací model spojený s modelem usazování pro spalování tuhé biomasy v pevném loži. Spalovací model se skládal části pro spalování v pevném loži, který poskytoval složení plynu a teplotní pole jako vstupy do druhé části pro spalování plynu nad pevným ložem. Ten zase poskytoval data pro usazovací model.

### 4.5.1 Rozložení velikostí

Rozložení velikostí částic značně ovlivňuje transport částic na teplosměnné plochy. Nejpřesněji se distribuce velikostí částic zjišťuje pomocí rastrovací elektronové mikroskopie (SEM) – jedná se však o poměrně náročnou a nákladnou metodu. U spalovacích zařízení je charakteristické bimodální rozložení velikostí zobrazené na Obr. 9, způsobené dvěma aktivními mechanismy tvorby popílku [11]

1. Odpaření a následná kondenzace alkalických solí, což vede k tvorbě sub-mikronových částí.
2. Koalescence minerální hmoty částic paliva, vedoucím k tvorbě mikronových částic.



Obr. 9 – Bimodální rozložení velikosti. Převzato z [11] a upraveno.

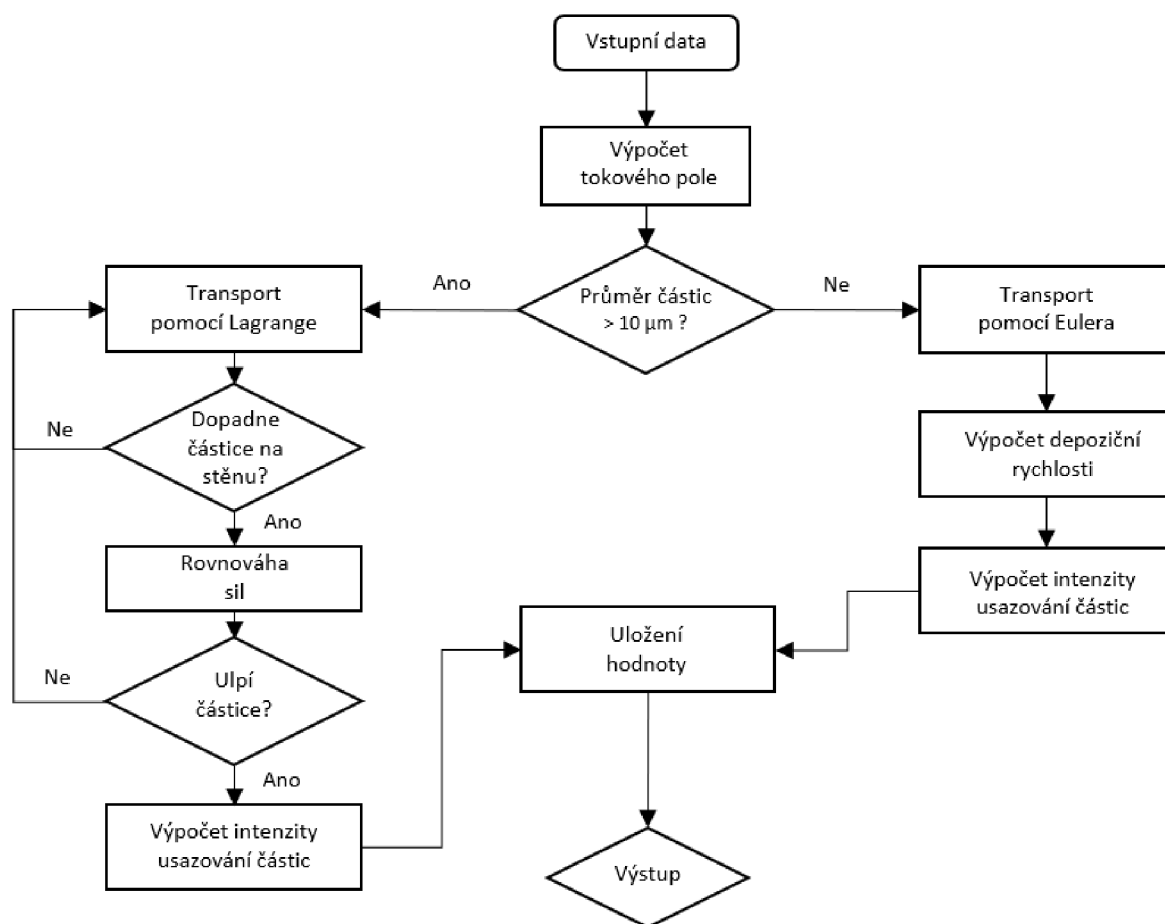
V simulacích se často pro zjednodušení používá pouze průměrná velikost částic. Pro modelování rozložení velikostí se u spalovacích procesů často používá Rosin-Rammlerovo rozložení velikostí [44]. Celkový rozsah velikostí se rozdělí do adekvátního počtu diskrétních intervalů, z nichž každý představuje střední průměr, pro který se počítá trajektorie. Rosin-Rammlerovo rozložení je popsáno rovnicí [23]:

$$Y_d = e^{-\left(\frac{d_p}{d_m}\right)^n} \quad (21)$$

kde  $Y_d$  je hmotnostní zlomek částic o průměru větším než  $d_p$ ,  $d_m$  je střední průměr částic a  $n$  je parametr rozložení.

## 5 Použitý model a jeho implementace

Model pro CFD simulaci počáteční fáze zanášení byl sestaven na základě rešeršních poznatků a poté byl implementován v prostředí ANSYS Fluent s pomocí uživatelsky definovaných funkcí (UDF). Vlastnosti spalin a tuhých částic byly určeny na základě dat převzatých z práce [47], ve které se autoři zabývali ukládáním popílku v HRSG spalovny na odpadní vodu pro tři typické operační podmínky daného zařízení. Vývojový diagram modelu je zobrazen na Obr. 10.



Obr. 10 – Vývojový diagram použitého modelu.

### 5.1 Model proudění spalin

Spaliny byly považovány za ideální plyn. Proudění spalin bylo popsáno pomocí Eulerovského modelu, kdy se spaliny považují za kontinuum. Obecné rovnice zachování hmoty, hybnosti a energie jsou následující [48]. Rovnice kontinuity (zachování hmoty) je vyjádřena pomocí vztahu (8).  $\rho_g$  je hustota tekutiny a  $\vec{u}_j$  vektor rychlosti.

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_g u_{g,j}) = 0 \quad (22)$$

Zachování hybnosti je popsáno Navier-Stokesovými rovnicemi.  $p_g$  je tlak tekutiny.

$$\frac{\partial(\rho_g u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g u_i u_j) = -\frac{\partial p_g}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu_g \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho_g \cdot \overline{u_i u_j} \right) \quad (23)$$

Zachování energie je vyjádřeno vztahem (6), kde  $H_g$  je entalpie tekutiny,  $\lambda_g$  je tepelná vodivost tekutiny a  $c_{p,g}$  je měrná tepelná kapacita tekutiny za konstantního tlaku.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \cdot H_g) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g u_{g,i} H_g) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\lambda_g}{c_{f,g}} \cdot \frac{\partial H_g}{\partial x_i} \right) \quad (24)$$

Proudění je modelováno jako turbulentní. Pro simulaci turbulentního proudění se za poslední tři desetiletí používají *Direct-Numerical Simulation* (DNS), *Large-Eddy Simulation* (LES) a *Reynolds-Averaged Navier-Stokes* (RANS) model. DNS představuje nejpřesnější simulaci turbulentního proudění, ale je výpočetně velmi náročný a lze použít jen pro toky s nízkým Reynoldsovým číslem a jednoduché geometrie. LES řeší pouze velké víry turbulentního proudění. Není tolik výpočetně náročný jako DNS, ale přesto pro většinu praktických aplikací jsou jeho výpočetní nároky příliš velké. Pro běžné inženýrské aplikace, zahrnující i simulace zanášení nevhodnější volbu představují RANS, který časově průměruje hodnoty turbulentního proudění pomocí Reynoldsovy rovnice, což výrazně snižuje výpočetní nároky [49]. Byly vyvinuty odlišné RANS modely, jako např. Spalart-Allmaras,  $k-\varepsilon$ ,  $k-\omega$  nebo RMS model [23].

Pro modelování turbulentního proudění byl použit  $k-\varepsilon$  model. K přenosu hmoty, hybnosti a energie doplňuje dvě transportní rovnice pro turbulentní kinetickou energii  $k$  a rychlost turbulentní disipace  $\varepsilon$ . Standartní  $k-\varepsilon$  model je vhodný pouze pro plně vyvinuté turbulentní proudění, tzn. že dobře nepopisuje proudění ve viskózní podvrstvě u stěny. Pro modelování turbulentního proudění tekutiny v této práci byla tedy zvolena varianta Realizable  $k-\varepsilon$  model, pro svou robustnost, nepříliš velkým výpočtovým nárokům a dostatečně přesným výsledkům pro širokou škálu inženýrských aplikací [23].

## 5.2 Modely transportu a usazování částic

Distribuce velikosti částic byla převzata z experimentálních zkoušek autorů [47]. Nejvíce částic bylo o velikosti 20  $\mu\text{m}$  a 0,2  $\mu\text{m}$ , proto budou v modelu použity tyto velikosti. Dále byly učiněny tyto předpoklady:

- částice se navzájem neovlivňují a ani neovlivňují proud spalin
- částice mají tvar dokonalé koule
- částice nerotují

Pro každou frakci tuhých částic byl zvolen odlišný model usazování. Částice o velikosti 20  $\mu\text{m}$  jsou nejvíce ovlivňovány setrvačnými silami a odporovými silami, zatímco částice o velikosti 0,2  $\mu\text{m}$  jsou nejvíce ovlivněny vlivy v mezní vrstvě.

### 5.2.1 Částice o velikosti 0,2 $\mu\text{m}$

Předpokládá se, že sub-mikronové částice jsou rovnoměrně rozmístěny se spalinami a celý tok se chová jako jednofázový. Proto byl transport těchto částic modelován pomocí Eulerovského přístupu, jak tomu bylo u spalin, viz 5.1.

Model usazování sub-mikronových částic byl sestaven na základě přístupu depoziční rychlosti, čímž bylo možné zahrnout transportní mechanismy v mezní vrstvě. Uvažované transportní mechanismy byly termoforéza a vliv turbulentního víření. Jejich bezrozměrné depoziční rychlosti byly vypočítány následovně [38]:

1. Bezrozměrná termoforézní depoziční rychlost

$$u_{d,th}^+ = \frac{F_{th} \cdot \tau_p}{m_p \cdot u^*} \quad (25)$$

kde termoforézní síla  $F_{th}$  je určena rovnicí 21, relaxační čas částice  $\tau_p$  podle rovnice (4) a hmotnost částice  $m_p$  vztahem:

$$m_p = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_p}{2}\right)^3 \cdot \rho_p \quad (26)$$

2. Bezrozměrná turbulentní depoziční rychlost

$$u_{d,tu}^+ = \left[ \frac{(0,64 \cdot k_s^+ + 0,5 d_p^+)^2}{3,42} \right]^{1 + \tau_p^{+2} \cdot L_l^+} \cdot \frac{1 + 8 \cdot e^{-\frac{(\tau_p^+ - 10)^2}{32}}}{27,03 \cdot (1 - \tau_p^{+2} \cdot L_l^+)} \quad (27)$$

kde  $L_l^+$  a  $k_s^+$  značí bezrozměrnou vztakovou sílu a výšku drsnosti. Bezrozměrná vztaková síla je dána vztahem:

$$L_l^+ = \frac{3,08 \cdot \rho_p}{\rho_g \cdot d_p^+} \quad (28)$$

kde  $d_p^+$  je bezrozměrný průměr částice spočtený podle vztahu:

$$d_p^+ = \frac{d_p \cdot u^* \cdot \rho_g}{\mu_g} \quad (29)$$

Bezrozměrná výška drsnosti  $k_s^+$  se vypočítá následovně:

$$k_s^+ = \frac{k_s \cdot u^* \cdot \rho_g}{\mu_g} \quad (30)$$

kde  $k_s$  je drsnost povrchu.

Celková bezrozměrná depoziční rychlost  $u_{d,tot}^+$  se poté určí součtem depozičních rychlostí pro uvažované transportní mechanismy:

$$u_{d,tot}^+ = u_{d,th}^+ + u_{d,tu}^+ \quad (31)$$

Intenzita dopadu částic na stěnu  $\dot{m}_{d,S}$  byla določítána podle rovnice:

$$\dot{m}_{d,S} = u_d \cdot C_p \quad (32)$$

kde  $C_p$  je koncentrace částic a depoziční rychlost  $u_d$  je spočítána z celkové bezrozměrné depoziční rychlosti  $u_{d,tot}^+$  dle rovnice (4).

### 5.2.2 Částice o velikosti 20 $\mu\text{m}$

Pro sledování trajektorií částic o velikosti 20  $\mu\text{m}$  byl použit Lagrangeovský přístup, kdy jsou částice považovány za diskrétní fázi a sleduje se dráha každé jednotlivé částice. Studium statistik trajektorií částic je Lagrangeova metoda také schopna vypočítat koncentraci částic a další fázová data [50]. Byl použit *Discrete Phase Model* (DPM), což je jeden z modelů využívající Euler-Lagrangeova přístupu. Plynná fáze je modelována jako kontinuum (Eulerovský přístup), zatímco pohyb dispergované fáze, tj. hrubých částic, je řešen jako pohyb hmotných bodů v Lagrangeovském rámci. Dispergovaná fáze může vyměňovat hmotnost, hybnost a energii s tekutou fází. Tento model je možné značně zjednodušit zanedbáním vzájemné interakce částic. To je ovšem možné pouze, když dispergovaná fáze zaujímá malý objemový podíl (<10 %), i když vysoký hmotnostní podíl je přijatelný ( $\dot{m}_{\text{částice}} \geq \dot{m}_{\text{tekutina}}$ ). Trajektorie částic jsou vypočítány individuálně ve specifikovaných intervalech během výpočtu tekuté fáze. Díky tomu je tento model vhodný pro modelování spalování uhlí a kapalných paliv nebo rozprašovacích sušáren, ale nevhodný pro modelování směsí kapalina-kapalina, fluidní vrstvy nebo jakékoli aplikace, kde objemový podíl dispergované fáze nelze zanedbat [23].

Pro usazování mikronové frakce částic byl použit přístup z práce [51]. Autoři [51] určili, zda se částice usadí na základě účinků působících sil na částici při dopadu. Model spadá do skupiny modelů kritické rychlosti, viz 4.1.3. Pravděpodobnost ulpění částice  $P_{stick}$  je dána následovně:

$$P_{stick} = \begin{cases} 0, & \text{if } F_{S,n} > F_{VW} + F_{g,n} \\ 1, & \text{if } F_{S,n} < F_{VW} + F_{g,n} \end{cases} \quad (33)$$

kde  $F_{S,n}$  je velikost normálové složky elastické odrazové síly,  $F_{VW}$  je velikost Van der Waalsovy síly a  $F_{g,n}$  je velikost normálové složky gravitační síly. Normálová složka elastické odrazové síly  $F_{S,n}$  je určena jako

$$F_{S,n} = K_S \cdot d_p^2 \cdot u_{p,n}^2 \quad (34)$$

$u_{p,n}$  je velikost normálové složky dopadové rychlosti částice a  $K_S$  je konstanta úměrnosti v závislosti na elasticitě částice a zanášeného povrchu, daná vztahem

$$K_S = G \cdot \left( \frac{d_p}{d_{ref}} \right)^n \quad (35)$$

kde hodnoty konstanty  $G = 1$ , mocniny  $n = 2$  a referenčního průměru částice  $d_{ref} = 20 \mu\text{m}$  byly zadány podle práce [51]. Van der Waalsova adhezivní síla  $F_{VW}$  je dána jako

$$F_{VW} = \frac{B \cdot d_p}{6 \cdot \delta^2} \quad (36)$$

kde  $B$  značí molekulární interakční konstantu, jejíž hodnota byla stanovena dle [51] na  $10^{-17} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ,  $\delta$  je vzdálenost mezi částicí a povrchem, určená jako polovina průměru částice. Normálová složka tíhové síly  $F_{g,n}$  je dána vztahem (19), kde  $\rho_p$  je hustota částice,  $\vec{g}$  je tíhové zrychlení a  $\vec{n}$  je normálový vektor stěny orientovaný dovnitř proudu tekutiny.

$$F_{g,n} = m_p \cdot (\vec{g} \cdot \vec{n}) \quad (37)$$

### 5.3 Implementace v prostředí ANSYS Fluent

Simulace zanášení tuhými částicemi byla provedena v softwaru ANSYS Fluent, který je jeden z nejčastěji používaných softwarů využívajících CFD pro simulaci proudění i pohybu tuhých částic. ANSYS Fluent nabízí možnost přizpůsobení modelů pomocí Uživatelsky definovaných funkcí (UDF), představujících uživatelem psané funkce v jazyce C.

#### 5.3.1 Model proudění

Pro simulaci turbulentního proudění byl zvolen *Realizable* k-ε model, který splňuje určitá matematická omezení Reynoldsových napětí v souladu s fyzikou turbulentního proudění. Od standardního k-ε modelu se liší dvěma hlavními vlastnostmi a sice, že obsahuje alternativní formulaci pro turbulentní viskozitu a modifikovanou transportní rovnici pro určení rychlosti disipace ε. Dále byla použita funkce *Enhanced Wall Treatment*, která kombinuje dvouvrstvý model s tzv. vylepšenými funkcemi stěny [23].

#### 5.3.2 Model částic s průměrem 20 μm

Jak už bylo zmíněno, pro sledování trajektorií částic o velikosti 20 μm byl použit DPM, u kterého ANSYS Fluent nabízí možnosti zakomponování různých sub-modelů – byl použit sub-model pro zahrnutí Saffmanova vztlaku. Částice jsou simulovány v ustáleném stavu – jsou sledovány ze své pozice vpuštění, dokud neuniknou z domény nebo nejsou splněna určitá terminační kritéria (v této práci – ulpění částice na stěně). Zdroje částic jsou během sledování aktualizovány a poté aplikovány na tekutou fázi v následujících iteracích toku [23].

ANSYS Fluent také nabízí možnost stochastického sledování částic. ANSYS Fluent potom používá okamžitou rychlost tekutiny k předpovědi turbulentní disperze částic pomocí integrace rovnic trajektorií pro jednotlivé částice podél dráhy částic během integrace. Pro dostatečný počet reprezentativních částic (tzv. *počet pokusů*) lze výpočtem trajektorie tímto způsobem zahrnout náhodné účinky turbulence na disperzi částic. K určení okamžité rychlosti tekutiny používá ANSYS Fluent *Discrete Random Walk* (DRW) model. V DRW modelu jsou složky fluktuující rychlosti diskretními po částech konstantními funkcemi času. Náhodná hodnota složek fluktuující rychlosti je udržována konstantní po časový interval daný charakteristickou životností vírů. DRW model špatně předpovídá rychlost dopadu částice na stěnu u částic s průměrem menším než několik mikronů. Proto byla tato možnost použita pouze u částic s průměrem 20 μm [23].

Model ulívání částic o průměru 20 μm byl implementován pomocí UDF, s využitím makra `DEFINE_DPM_EROSION`, umožňujícího změnit rychlost nebo i vlastnosti sledované částice. Pomocí tohoto makra byla rovněž zaznamenávána intenzita dopadu částic na stěnu vypočítána silovou bilancí popsanou v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Pokud ze silové bilance vyšlo, že se částice mají usadit, byla aktualizována hodnota hmotnostního toku ulpívajících částic v daném místě stěny, částice byla považována za usazenou dále nebyla sledována.



### 5.3.3 Model částic s průměrem 0,2 μm

Pro ulpění částic o průměru 0,2 μm bylo využito uživatelsky definovaného skaláru (UDS) pro výpočet transportní rovnice. Pro obecnou skalární veličinu  $\Phi_k$  v případě ustáleného stavu vyřeší Ansys Fluent transportní rovnici [23]:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho_g \cdot u_{g,i} \cdot \Phi_k - \Gamma_k \cdot \frac{\partial \Phi_k}{\partial x_i} \right) = S_{\Phi_k} \quad k = 1, \dots, N \quad (38)$$

kde  $\Gamma_k$  a  $S_{\Phi_k}$  jsou uživatelem dodaný difuzní koeficient a zdrojový člen pro každou rovnici  $N$  skaláru. První člen rovnice představuje konvekci a druhý člen difuzi. V UDS byl libovolným skalárem  $\Phi_k$  hmotnostní zlomek částic o průměru 0,2 μm. Dále byl spočítán difúzní koeficient  $J$  jako součet difúzních koeficientů pro difúzi vlivem Brownova pohybu  $D_B$  a vířivou difúzi  $\varepsilon_p$ .  $D_B$  a  $\varepsilon_p$  se určí následujícími vzorci [48]:

$$D_B = \frac{k_B \cdot T_g}{3 \cdot \pi \cdot \mu_g \cdot d_p} \quad (39)$$

kde  $k_B$  je Boltzmannova konstanta rovna  $1,38066 \cdot 10^{-23}$  J/K.

$$\varepsilon_p = \frac{\vartheta_t}{1 + \frac{\tau_p}{\tau_l}} \quad (40)$$

kde  $\vartheta_t$  je turbulentní viskozita. Časové měřítko  $\tau_l$  je určeno jako

$$\tau_l = \frac{v_t}{v'^2} \quad (41)$$

kde  $\overline{v'^2}$  je efektivní hodnota (RMS) místní rychlosti fluktuace kolmé ke stěně, která je pro k-ε model rovna:

$$\overline{v'^2} = \frac{2k}{3} \quad (42)$$

kde  $k$  je turbulentní kinetická energie.

Difúzní koeficient  $J$  má jednotky  $m^2/s$ . Do prostředí ANSYS Fluent je potřeba, aby uživatelem zadaný difúzní koeficient  $\Gamma_k$  byl v jednotkách  $kg/(m \cdot s)$ , toho bylo dosaženo vynásobením  $J$  hustotou spalin. Uživatelem zadaný difúzní koeficient  $\Gamma_k$  byl do ANSYS Fluent implementován pomocí makra DEFINE\_PROPERTY, které umožňuje specifikovat vlastní vlastnost materiálu. Zdrojovým členem  $S_{\Phi_k}$  byla intenzita usazování částic na objem buňky  $\dot{m}_{d,V_{dep}}$ , spočítána jako:

$$\dot{m}_{d,V} = \frac{\dot{m}_{d,S} \cdot S_{dep}}{V_{dep}} \quad (43)$$

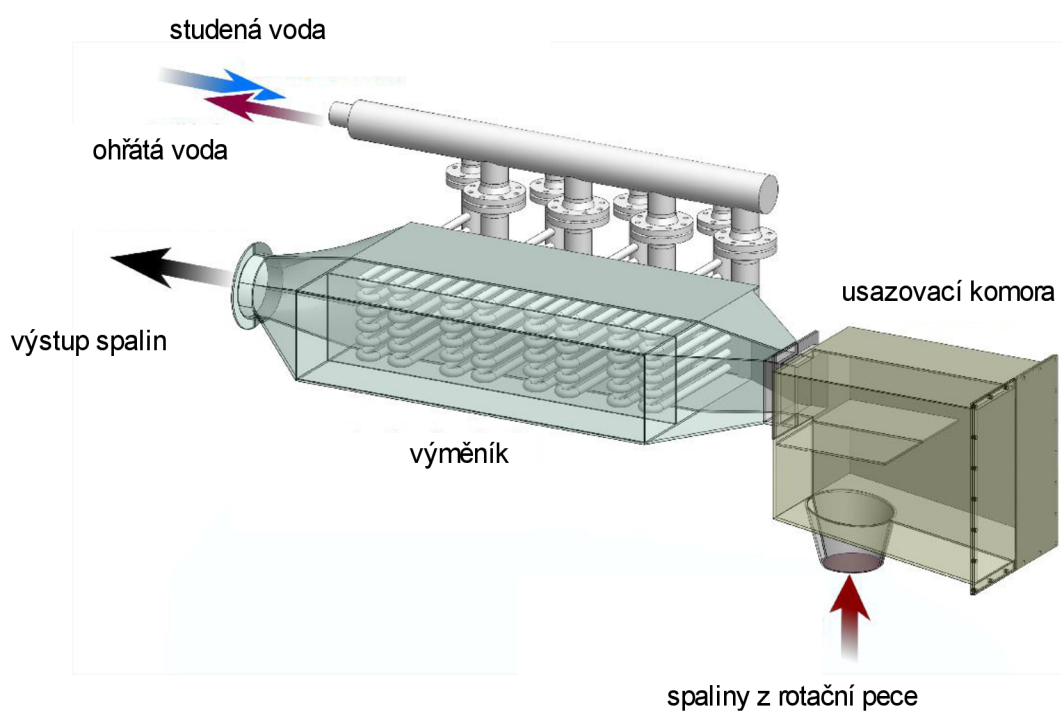
kde  $S_{dep}$  je velikost plochy (*face*) buňky dopadu částice,  $V_{dep}$  je objem buňky dopadu částice. Postup určení intenzity dopadu částic na stěnu  $\dot{m}_{d,S}$  byl popsán v 5.2.1.

## 6 Modelový případ

V této práci se vycházelo ze zařízení na spalování tuhých paliv, které je součástí experimentální základny Ústavu procesního inženýrství FSI VUT. Skládá ze dvou hlavních částí [52].

První je rotační pec, ve které jsou spalována testovaná tuhá paliva (např. dřevní štěpka, čistírenské kaly). Pec je zapojena v souprůdém uspořádání, kdy spaliny i palivo procházejí pecí stejným směrem. Pro stabilizaci spalování je pec osazena hořákem na zemní plyn.

Na pec navazuje sestava odvodu spalin, která se skládá ze dvou částí. První z nich je usazovací komora, ve které se usazuje část tuhých částic nesených spalinami. Za usazovací komorou následuje výměník se čtyřmi trubkovými svazky v jeho hlavním kanálu. Komora i výměník jsou rozebíratelné a umožňují prohlídku vzniklých nánosů. Na vstupu i výstupu výměníku jsou měřeny mimo jiné teplota spalin, průtok spalin a koncentrace tuhých částic ve spalinách. Podrobně je zařízení popsáno v práci [53].



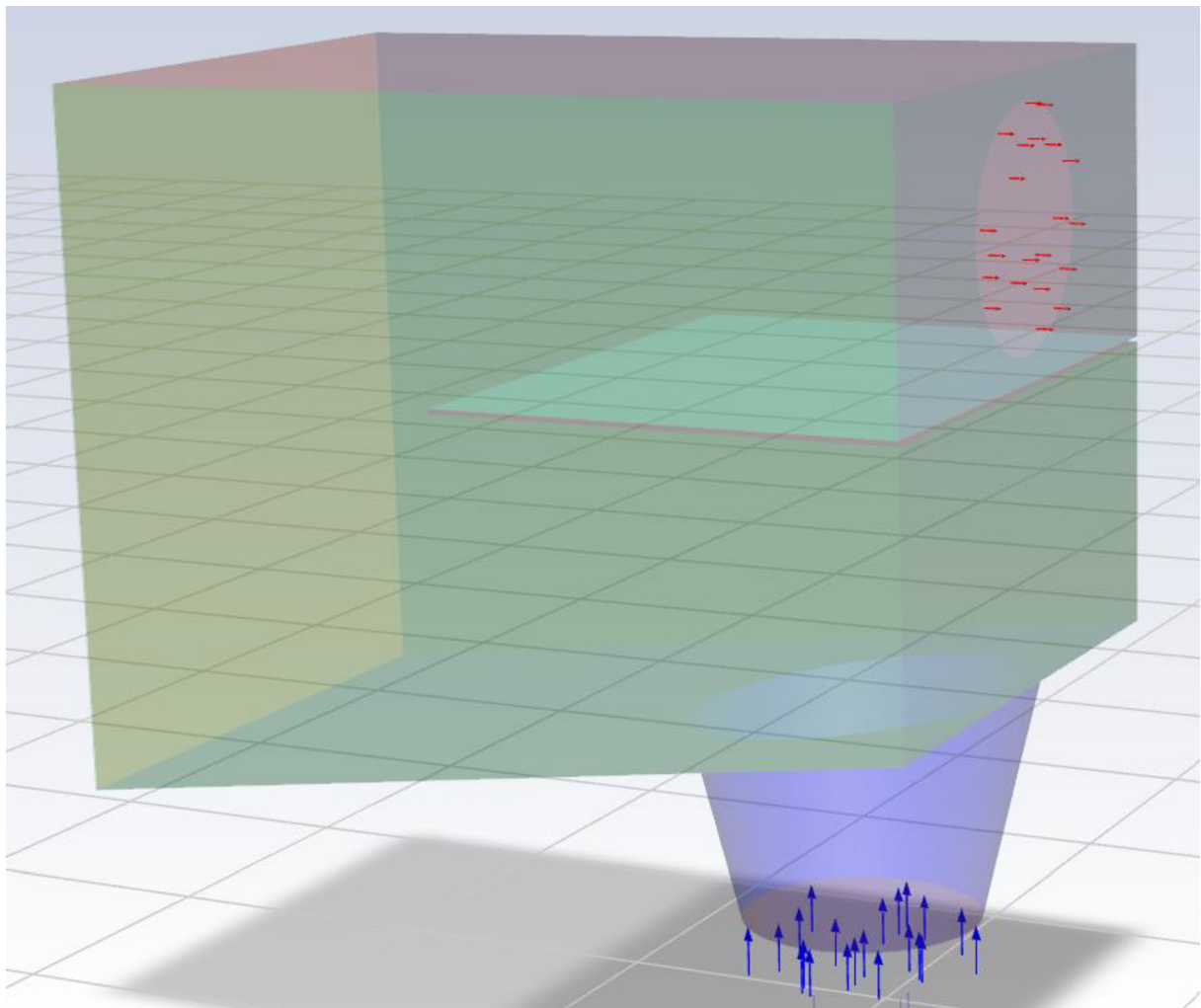
Obr. 11 – Schéma sestavy odvodu spalin. Převzato z [52] a upraveno.

Modelována byla nejprve usazovací komora. Výsledné hmotnostní toky usazených částic, rychlost proudění na výstupu sloužily jako vstupní hodnoty pro trubkový výměník tepla, který byl následně modelován. Výměník tepla byl zjednodušen na 2D případ (Obr. 13), jelikož dostatečně jemná síť kolem trubek pro 3D případ by obsahovala velké množství buněk, což by vedlo k příliš časově náročným výpočtům.

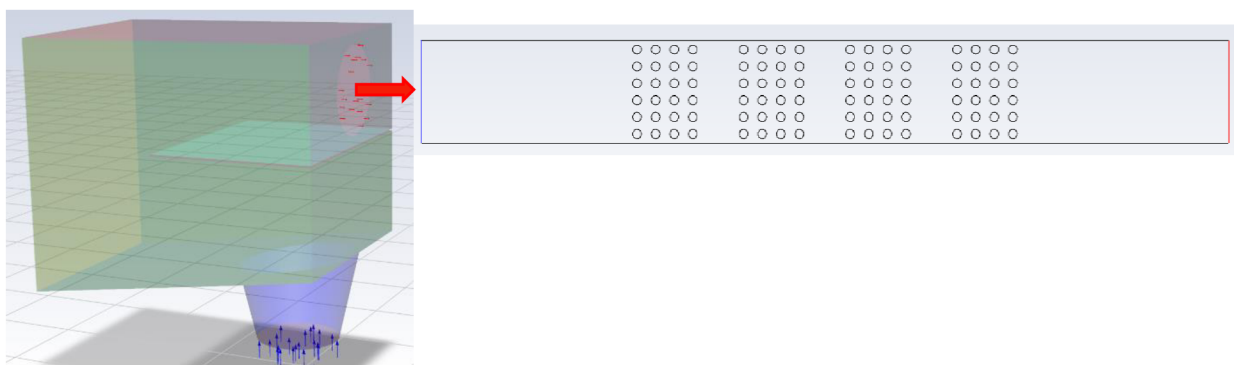
### 6.1 Geometrie

Na Obr. 12 je zobrazena geometrie usazovací komory, jejíž délka je 750 mm, výška 500 mm, šířka 500 mm, průměr vstupu a výstupu je 200 mm a přepážka má tloušťku 4 mm. Výměník tepla byl zjednodušen na 2D kanál o délce 2415 mm, výšce 305 mm a šířce trubek 25 mm. Délka kanálu je dána vzdáleností vstupu od os prvních trubek, která je určena jako 25násobek

průměru trubek. Stejnou délku má vzdálenost výstupu od os posledních trubek. Tato délka zaručuje plně vyvinutý proud před a za trubkami [54].



Obr. 12 – Geometrie usazovací komory (modrými šipkami je vyznačen vstup, červenými výstup)



Obr. 13 – Geometrie usazovací komory a 2D řez výměníku tepla

## 6.2 Výpočtová síť

Prvním krokem při řešení CFD úloh je vytvoření výpočtové sítě/mřížky, která definuje buňky, na kterých se počítají proměnné toku (rychlost, teplota, tlak apod.) v celé výpočetní oblasti.

Existují strukturované či nestrukturované sítě. Strukturované sítě se skládají z rovinných buněk o 4 hranách pro 2D případy a z objemových buněk o 6 plochách pro 3D případy. Nestrukturovaná síť se skládá z buněk o různých tvarech. Nejčastěji to jsou trojúhelníky nebo čtyřúhelníky pro 2D případy a čtyřstěny nebo šestistěny pro 3D případy. Strukturovanou sítí je generováno méně buněk než sítí nestrukturovanou, což vede ke kratší době výpočtu. Na druhou stranu je obtížné vytvořit strukturovanou síť u složitých geometrií. V mezních vrstvách je vhodnější strukturovaná síť, jelikož umožní jemnější rozlišení pro stejný počet buněk jako u nestrukturované sítě. Tím se zajistí správný výpočet proměnných toku, které se kolmo ke stěně velmi rychle mění [55]. V oblasti mezní vrstvy se proto často generují tzv. inflační vrstvy, což je strukturovaná síť s postupně rostoucími buňkami. Aby se zajistilo, že inflační vrstvy pokrývají celou mezní vrstvu sleduje se bezrozměrná vzdálenost od stěny  $y^+$  k prvnímu uzlu sítě. Aby byla zahrnuta celá mezní vrstva, je snaha dosáhnout hodnot  $y^+ \sim 1$ , od hodnot  $\geq 10$  se nacházíme v tzv. *buffer layer*, kde proudění převládají stále viskózní efekty, ale turbulentní efekty se již stávají významnými [56].

Je také potřeba sledovat kvalitu sítě. Jako např. zkosení buněk, které by mělo být co nejmenší, jelikož by mohlo vést k problémům s konvergencí a nepřesnostem v numerickém řešení. Obecným pravidlem je, že maximální zkosení by se mělo udržovat pod 0,85, přičemž průměrná hodnota by neměla přesahovat 0,33 [23]. Dalším sledovaným parametrem bývá ortogonalita buněk, kdy je snaha dosáhnout hodnoty 1. Dalšími faktory ovlivňujícími kvalitu buňky jsou náhlá změna velikosti buněk a velký poměr velikostí stran buněk [55].

### 6.2.1 Výpočtová síť usazovací komory

Usazovací komora byla řešena jako 3D případ. Byla vytvořena polyhedrální síť s inflačními vrstvami podél stěn. Polyhedrální buňky s mnoha  $n$  stěnami mají více sousedních buněk než buňky tetrahedrálční či prizmatické. To je výhodné pro výpočet gradientů parametrů proudění [55]. Dále následovalo provedení studie vlivu sítě, kdy byly vytvořeny rozdílně jemné sítě. U sítí se porovnávaly faktory ovlivňující jejich kvalitu zmíněné v 6.2. Jako výsledná síť byla použita Síť 3, nejvyšší hodnota  $y^+$  byla stejná jako u Sítě 2, stejně tak ortogonalita a zkosení. Hmotnostní tok usazených částic o průměru 20  $\mu\text{m}$  byl téměř totožný u Sítě 3 a Sítě 2 a vzhledem k tomu, že hmotnostní tok částic o průměru 0,2  $\mu\text{m}$  je řádově mnohem menší než na vstupu usazovací komory (viz 6.4.2), nebyla dále síť zjemňována.

Tab. 1 – Sledované parametry výpočtových sítí usazovací komory při studii vlivu sítě

	Sít' 1	Sít' 2	Sít' 3
Výška první buňky inflační vrstvy [mm]	10	5	2,5
Počet inflačních vrstev N [-]	3	4	6
Bezrozměrná vzdálenost $y^+$ kolmá ke stěně [-]	11,4	8,1	8,1
Počet buněk [-]	130886	437654	471571
Průměrná ortogonalita [-]	0,944	0,936	0,935
Minimální ortogonalita [-]	0,2	0,2	0,2
Průměrné zkosení [-]	0,056	0,064	0,065
Maximální zkosení [-]	0,8	0,8	0,8
Hmotnostní tok usazených částic o průměru 0,2 $\mu\text{m}$ [mg/s]	1,39e-13	4,48e-4	1,05e-14
Hmotnostní tok usazených částic o průměru 20 $\mu\text{m}$ [mg/s]	0,264	0,221	0,224

### 6.2.2 Výpočtová síť výměníku tepla

Byla vytvořena síť o 267751 buňkách s maximální hodnotou  $y^+ = 1,15$ . Bylo vytvořeno 19 inflačních vrstev kolem každé trubky a 15 inflačních vrstev podél stěn hlavního kanálu.

### 6.3 Vlastnosti spalin a tuhých částic

Zde se vycházelo z průměrných hodnot dat z práce [47].

#### 6.3.1 Vlastnosti spalin

Vlastnosti spalin popsány v Tab. 2 jako hustota, viskozita, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita byly dopočteny. Hustota byla dopočtena pomocí stavové rovnice. Viskozita, tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita se získali na základě kinetické teorie [23]. Pro ukázkou je zde uveden výpočet viskozity spalin:

$$\mu_g = \sum_i^n \frac{x_i \cdot \mu_i}{\sum_j^n x_j \cdot \varphi_{i,j}} \quad (44)$$

$$\varphi_{i,j} = \frac{\left[ 1 + \left( \frac{\mu_i}{\mu_j} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{0,25} \right]^2}{\left[ 1 + \frac{M_i}{M_j} \right]^{0,5}} \quad (45)$$

kde  $x$  je molární zlomek složky spalin,  $M$  je molární hmotnost složky spalin,  $\mu$  je viskozita složky spalin.

Tab. 2 – Vlastnosti spalin

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Složení		
N <sub>2</sub>	50,90	[obj. %]
H <sub>2</sub> O	38,19	[obj. %]
O <sub>2</sub>	3,13	[obj. %]
CO <sub>2</sub>	7,77	[obj. %]
SO <sub>2</sub>	0,01	[obj. %]
Hustota	0,5298	[kg/m <sup>3</sup> ]
Viskozita	3,6986e-5	[Pa·s]
Tepelná vodivost	0,0676	[W/(m·K)]
Měrná tepelná kapacita	1417,2634	[J/(kg·K)]

### 6.3.2 Vlastnosti tuhých částic

Jak bylo zmíněno v **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**, byly vybrány dva rozměry částic (20 a 0,2 μm). Zanášení tak bude probíhat ve dvou režimech, viz 3.1. Vlastnosti tuhých částic jsou popsány v Tab. 3.

Tab. 3 – Vlastnosti tuhých částic

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Hustota	2600	[kg/m <sup>3</sup> ]
Tepelná vodivost	1,89	[W/(m·K)]
Měrná tepelná kapacita	1110,9245	[J/(kg·K)]
Průměr		
Setrvačný režim (3.1)	20	[μm]
Difuzní režim (3.1)	0,2	[μm]

## 6.4 Okrajové podmínky usazovací komory

Jako okrajové podmínky posloužili data z měření na experimentálním zařízení Ústavu procesního inženýrství FSI VUT. Vstupní rychlost je 1,6 m/s a teplota spalin 315 °C.

### 6.4.1 Okrajové podmínky vstupu spalin – usazovací komora

V Tab. 4 jsou vypsány okrajové podmínky spalin na vstupu do komory. Intenzita turbulence  $I$  byla dopočítána podle vztahu [23]:

$$I = 0,16 \cdot (Re_{in})^{-\frac{1}{8}} \quad (46)$$

kde  $Re_{in}$  je Reynoldsovo číslo na vstupu do domény.

Tab. 4 – Okrajové podmínky vstupu spalin do usazovací komory

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Teplota	315	[°C]
Vstupní rychlost	1,6	[m/s]
Intenzita turbulence	5,47	[-]

### 6.4.2 Okrajové podmínky pro tuhé částice – usazovací komora

Vstupní teplota a rychlost částic se uvažovaly stejné jako vstupní teplota a rychlost spalin. Jako okrajová podmínka pro UDS slouží hmotnostní zlomek částic o velikosti 0,2 μm na vstupu, který byl určen jako:

$$x_{p0,2,in} = \frac{\dot{m}_{p0,2,in}}{\dot{m}_{p0,2,in} + \dot{m}_{p20,in} + \dot{m}_{g,in}} \quad (47)$$

kde  $\dot{m}_{p0,2,in}$ ,  $\dot{m}_{p20,in}$  a  $\dot{m}_{g,in}$  jsou vstupní hmotnostní toky částic o velikosti 0,2 μm, částic o velikosti 20 μm a spalin.

Tab. 5 – Okrajové podmínky vstupu tuhých částic – usazovací komora

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Teplota	315	[°C]
Vstupní rychlost	1,6	[m/s]
Hmotnostní tok		
Částice o velikosti 20 μm	0,9	[mg/s]
Částice o velikosti 0,2 μm	2	[mg/s]
Hmotnostní zlomek částic o velikosti 0,2 μm	0,00031	[-]

### 6.4.3 Okrajové podmínky stěn usazovací komory

Na stěnách je nastavena podmínka pro přenos tepla konvekcí. Každá stěna má nastaveno teplotu volného proudu na 315 °C a součinitel prostupu tepla na 20 W/(m<sup>2</sup>·K).

### 6.5 Okrajové podmínky výměníku tepla

Jako okrajové podmínky na vstupu výměníku tepla byly použity hodnoty z výstupu usazovací komory.

#### 6.5.1 Vstup spalin

Částice o velikosti 20 μm byly vpouštěny směrem kolmo na vstup domény z 1000 rovnoměrně rozložených bodů. Intenzita turbulence na vstupu byla opět dopočítána podle rovnice (46).

Tab. 6 – Okrajové podmínky vstupu spalin – výměník tepla

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Teplota	315	[°C]
Vstupní rychlost	1,75	[m/s]
Intenzita turbulence	5,23	[-]

#### 6.5.2 Tuhé částice

Opět se vstupní teplota a rychlost částic uvažovaly stejné jako vstupní teplota a rychlost spalin. Jelikož došlo k usazení v usazovací komoře řádově mnohem menšího množství sub-mikronových částic, než bylo množství částic na vstupu do usazovací komory viz. 7.1, zůstává hmotnostní tok sub-mikronových částic na vstupu do výměníku tepla nezměněn.

Tab. 7 – Okrajové podmínky vstupu tuhých částic – výměník tepla

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Teplota	315	[°C]
Vstupní rychlost	1,75	[m/s]
Hmotnostní tok		
Částice o velikosti 20 μm	0,676	[mg/s]
Částice o velikosti 0,2 μm	2	[mg/s]
Hmotnostní zlomek částic o velikosti 0,2 μm	0,00031	[-]

#### 6.5.3 Okrajové podmínky na stěnách výměníku tepla

Byly nastaveny rozdílné okrajové podmínky na stěnách pláště a trubek pro přenos tepla konvekcí.



Tab. 8 – Okrajové podmínky na stěnách výměníku tepla

	Teplota volného proudu [°C]	Součinitel prostupu tepla [W/(m <sup>2</sup> K)]
Plášť	315	20
Trubky	30	20

## 7 Výsledky a diskuse

Simulace zanášení tuhými částicemi o průměru 0,2  $\mu\text{m}$  a 20  $\mu\text{m}$  byla nejprve provedena v usazovací komoře. Po zpracování výsledků byla provedena simulace zanášení tuhými částicemi o průměru 0,2  $\mu\text{m}$  a 20  $\mu\text{m}$  ve výměníku tepla.

### 7.1 Zanášení v usazovací komoře

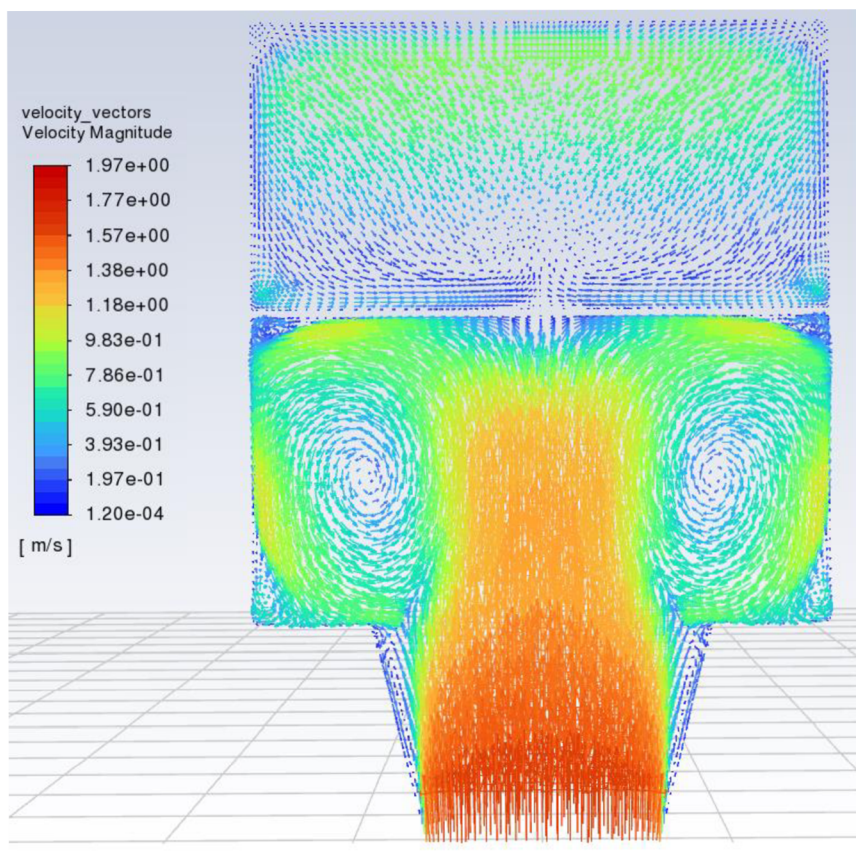
Dle očekávání proběhlo zanášení hlavně hrubými částicemi, zatímco množství usazených sub-mikronových částic bylo řádově několika-ti násobně nižší než množství částic na vstupu. Vliv na to mělo, že teplota na stěnách byla nastavena stejná jako teplota spalin a tím nedocházelo ke změně teploty. Takže sub-mikronové částice nemohly být ovlivněny termoforézou (neexistovaly teplotní gradienty).

Tab. 9 – Hmotnostní toky usazených částic v usazovací komoře

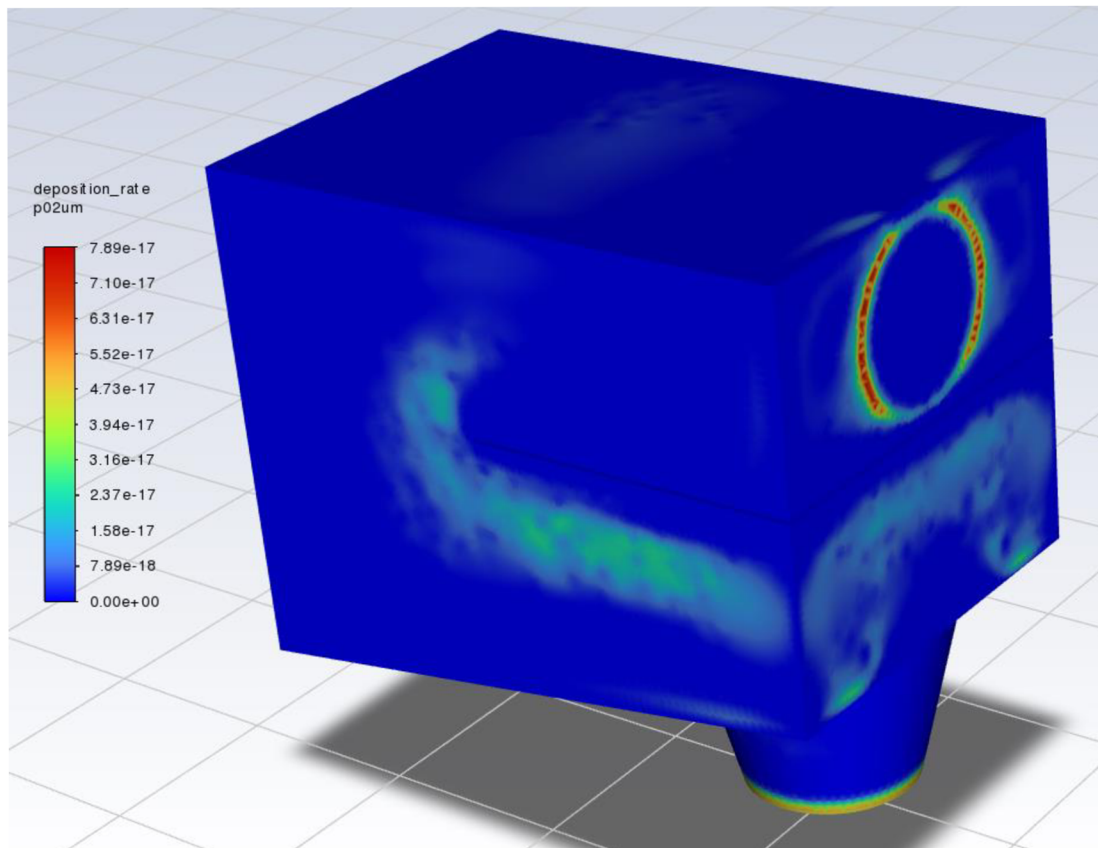
	Hmotnostní tok částic na vstupu [mg/s]	Hmotnostní tok usazených částic [mg/s]
Částice o průměru 0,2 $\mu\text{m}$	2	1,05e-14
Částice o průměru 20 $\mu\text{m}$	0,9	2,24e-4

#### 7.1.1 Zanášení částicemi o průměru 0,2 $\mu\text{m}$

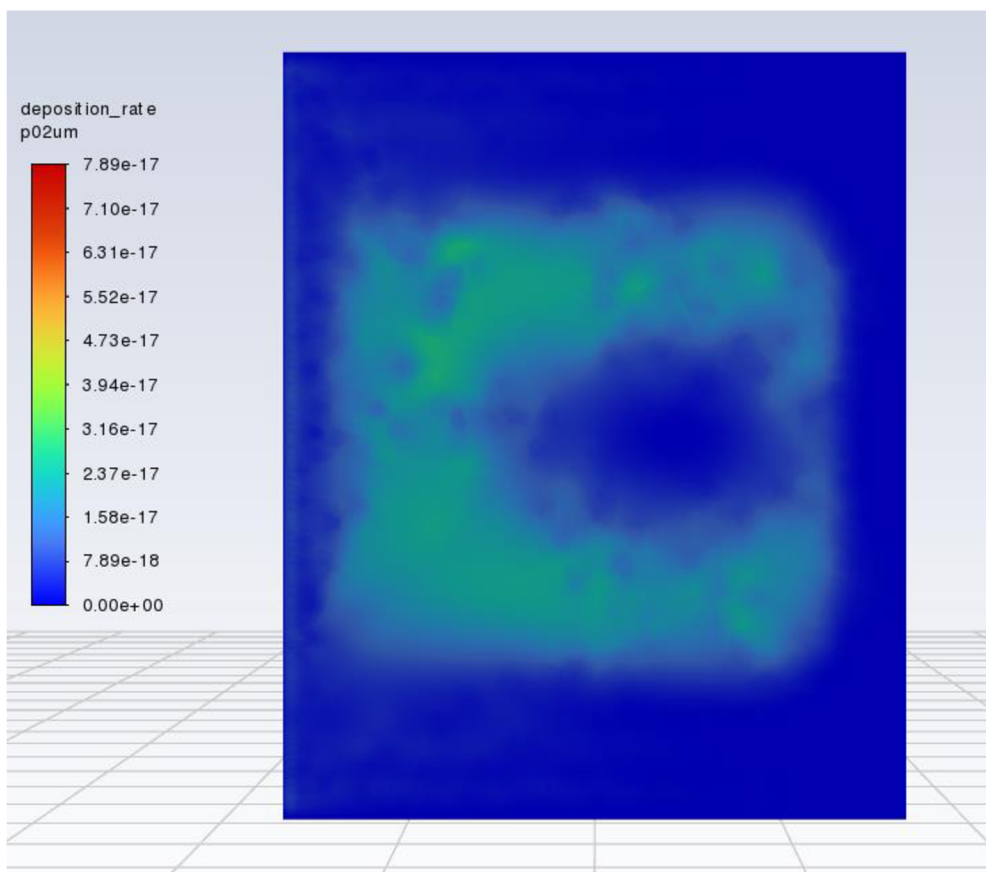
Zanášení částicemi o průměru 0,2  $\mu\text{m}$  v usazovací komoře kopírovalo proudění spalin, jak bylo předpokládáno. Na Obr. 14 je zobrazen rychlostní profil na řezu vedeného středem vstupu (osy YZ), z kterého lze určit charakter proudění. Jak jde vidět na Obr. 15 sub-mikronové částice ulpívají na stěnách v místech turbulentních vírů s rostoucí rychlostí.



Obr. 14 – Rychlostní profil na řezu vedeného středem vstupu usazovací komory



Obr. 15 – Zanášení usazovací komory částicemi o průměru 0,2 μm



Obr. 16 – Zanášení spodní části přepážky usazovací komory částicemi o průměru 0,2  $\mu\text{m}$

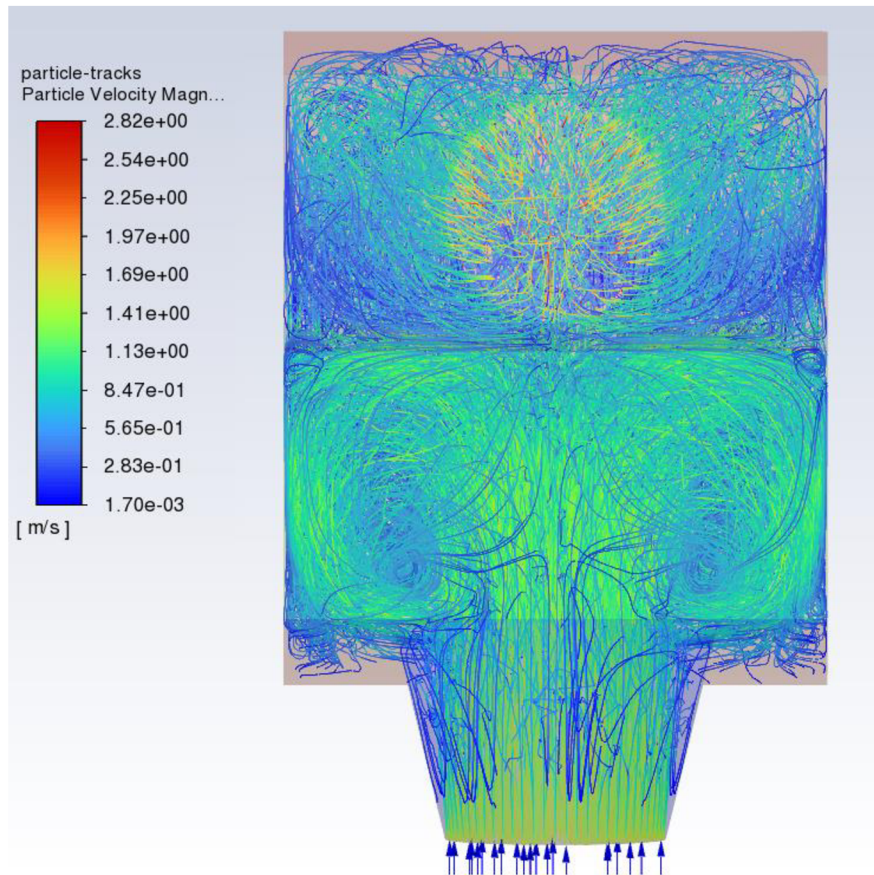


Obr. 17 – Zanášení spodní části usazovací komory částicemi o průměru 0,2  $\mu\text{m}$

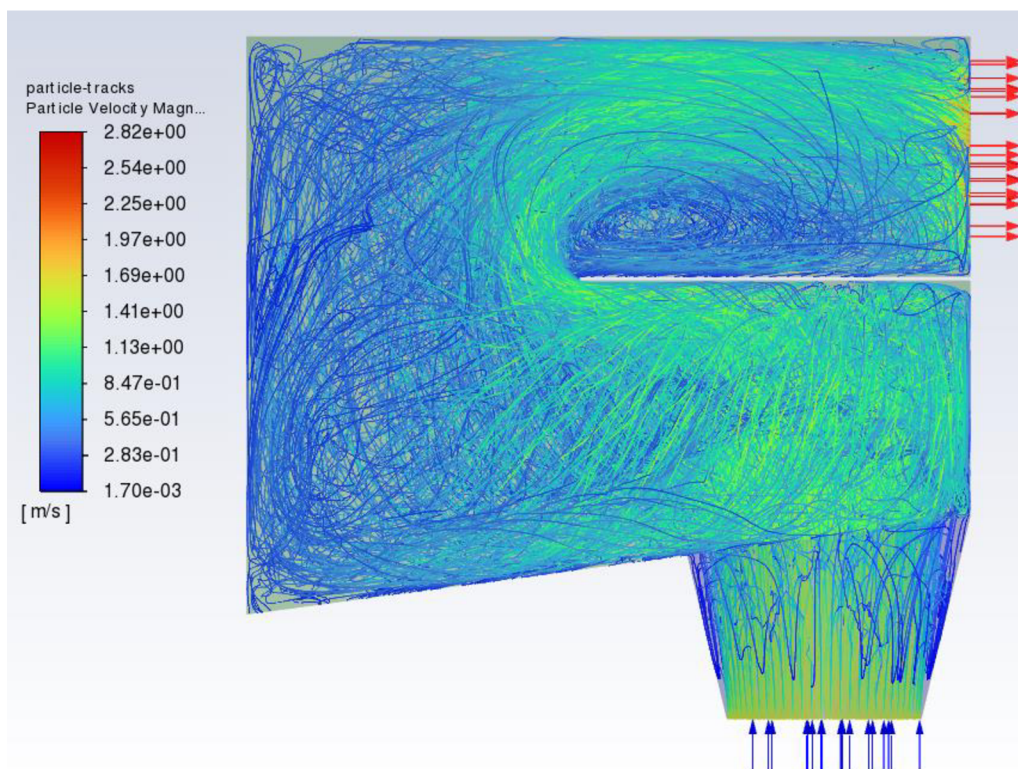
Hmotnostní tok usazených částic na přední stranu (naproti výstupu) usazovací komory a vrchní stranu přepážky dosáhl řádově nižších hodnot než na ostatních stěnách.

### 7.1.2 Zanášení částicemi o průměru 20 $\mu\text{m}$

K zanášení usazovací komory částicemi o průměru 20  $\mu\text{m}$  nejvíce docházelo na spodní části usazovací komory, kde, jak lze vidět na Obr. 18, proudění tvoří dva víry. Částice s dostatečnou setrvačností se poté od víru oddělí a dopadají na stěnu komory. Dalším zanášeným místem je vrchní část přepážky, kde vznikla mrtvá zóna. V poslední řadě částice ulpěly na rozšíření od vstupu.



Obr. 18 – Trajektorie částic o průměru 20  $\mu\text{m}$  v usazovací komoře (pohled ze strany výstupu).



Obr. 19 – Trajektorie částic o průměru 20  $\mu\text{m}$  v usazovací komoře (pohled z boční strany).

Po dopadu částic na plochu komory nedošlo k jejich odrazu, což bylo očekáváno vzhledem k malé rychlosti částic v oblastech dopadu. V použitém modelu ulpívání částic by částice museli dosáhnout dopadové rychlosti alespoň okolo 0,35 m/s, aby normálová složka elastické odrazové síly  $F_{S,n}$  dosáhla vyšší hodnoty než součet složek sil přispívajících k ulpění a došlo tak k odrazu částic (viz kapitola 5.2.2).

## 7.2 Zanášení ve výměníku tepla

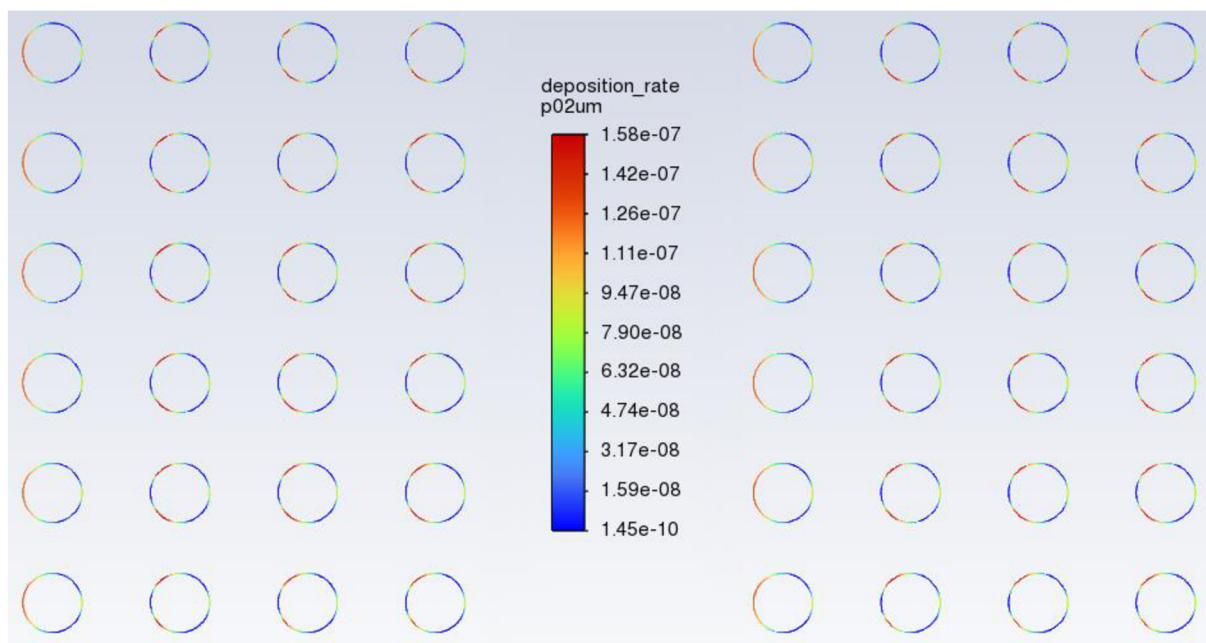
Zde už došlo k většímu zanášení sub-mikronovými částicemi oproti zanášení v usazovací komoře, díky přítomným teplotním gradientům viz Obr. 22 a Obr. 23. Hmotnostní tok usazených částic hrubé frakce naopak klesl. Vliv na to měla vyšší rychlost proudění.

Tab. 10 – Hmotnostní toky usazených částic ve výměníku tepla

	Hmotnostní tok částic na vstupu [mg/s]	Hmotnostní tok usazených částic [mg/s]
Částice o průměru 0,2 $\mu\text{m}$	2	4,60e-4
Částice o průměru 20 $\mu\text{m}$	0,676	0,0622

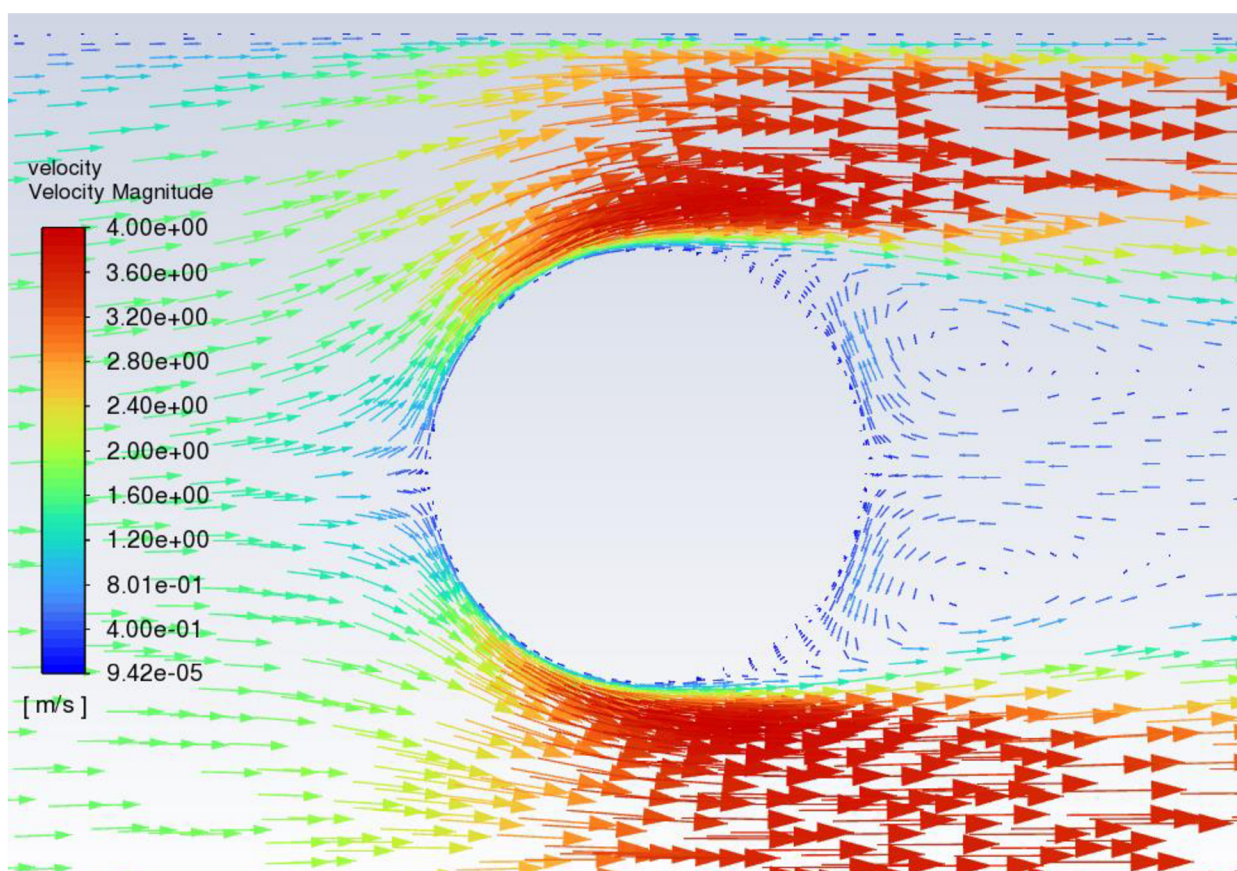
### 7.2.1 Zanášení částicemi o průměru 0,2 $\mu\text{m}$

Zanášení jemnou frakcí částic je u všech 4 svazků trubek velmi podobného charakteru, jak lze vidět na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** (pro velké rozměry geometrie jsou zobrazeny pouze první 2 svazky výměníku). K zanášení přední strany trubek docházelo pouze u trubek prvních svazků.

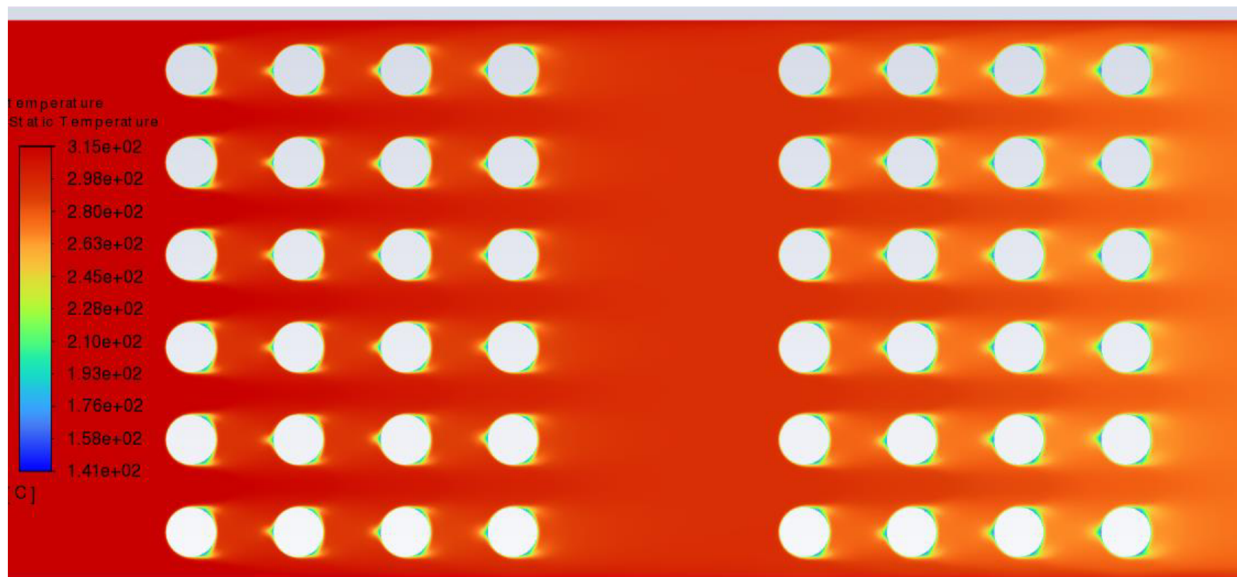


Obr. 20 – Intenzita dopadu částic o průměru 0,2 μm na první dva trubkové svazky.

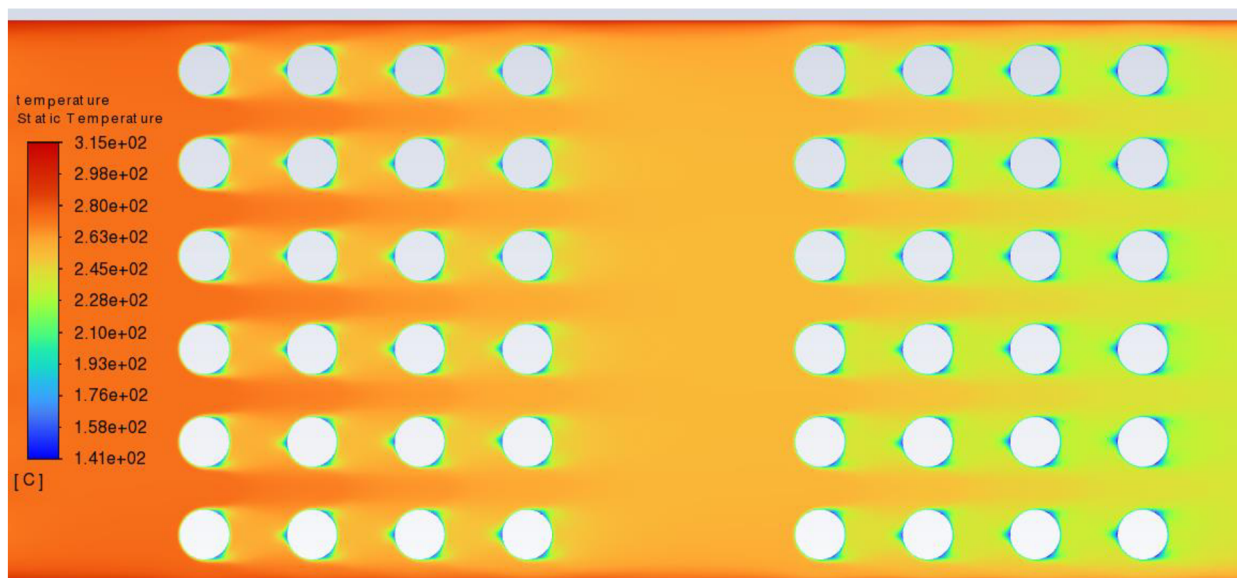
K zanášení na zadních stranách trubek dochází u každé trubky, což je způsobeno turbulentními víry vznikajícími v těchto místech viz. Obr. 21. Hmotnostní tok částic o průměru 0,2 μm usazených na trubkových svazcích výměníku je 0,46 mg/s. Naproti tomu, hmotnostní tok částic o průměru 0,2 μm, jenž se usadily na plášť výměníku je  $5,84 \cdot 10^{-8}$  mg/s.



Obr. 21 – Turbulentní víry za trubkami výměníku tepla.



Obr. 22 – Teplotní pole v oblasti 1. a 2. svazku trubek výměníku tepla.

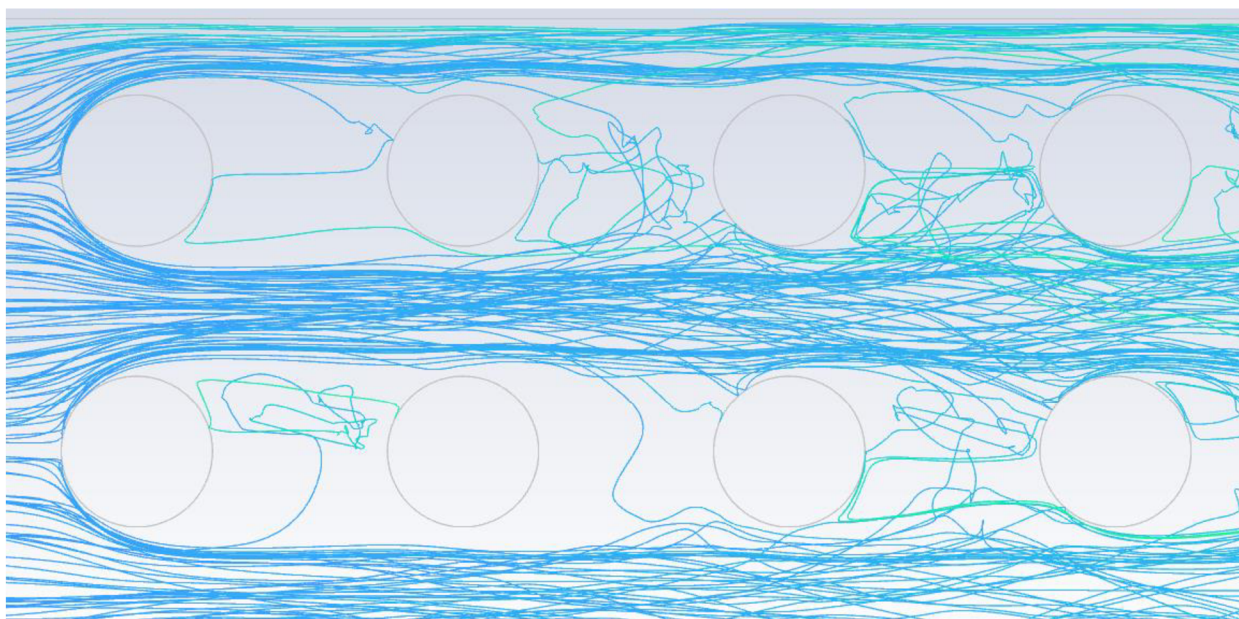


Obr. 23 – Teplotní pole v oblasti 3. a 4. svazku trubek výměníku tepla.

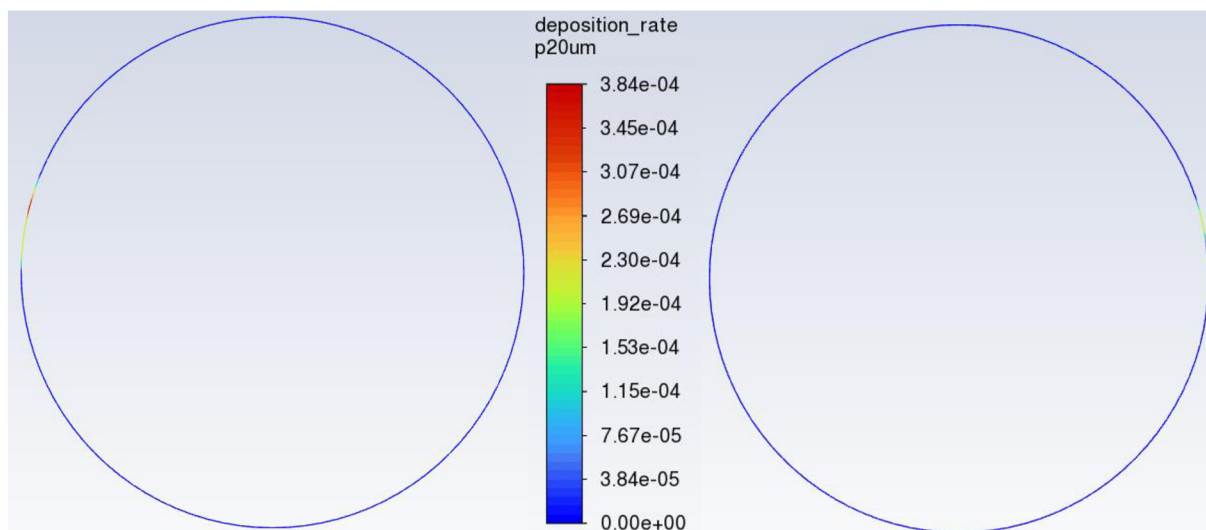
## 7.2.2 Zanášení částicemi o průměru 20 $\mu\text{m}$

Trajektorie částic o průměru 20  $\mu\text{m}$  je značně nahodilá, jak je ukázáno na Obr. 24. To je způsobeno DRW modelem. To má za následek nerovnoměrné usazování částic, které lze vidět na následujících obrázcích (opět jsou zobrazeny pouze některé trubky vzhledem k velikosti geometrie).

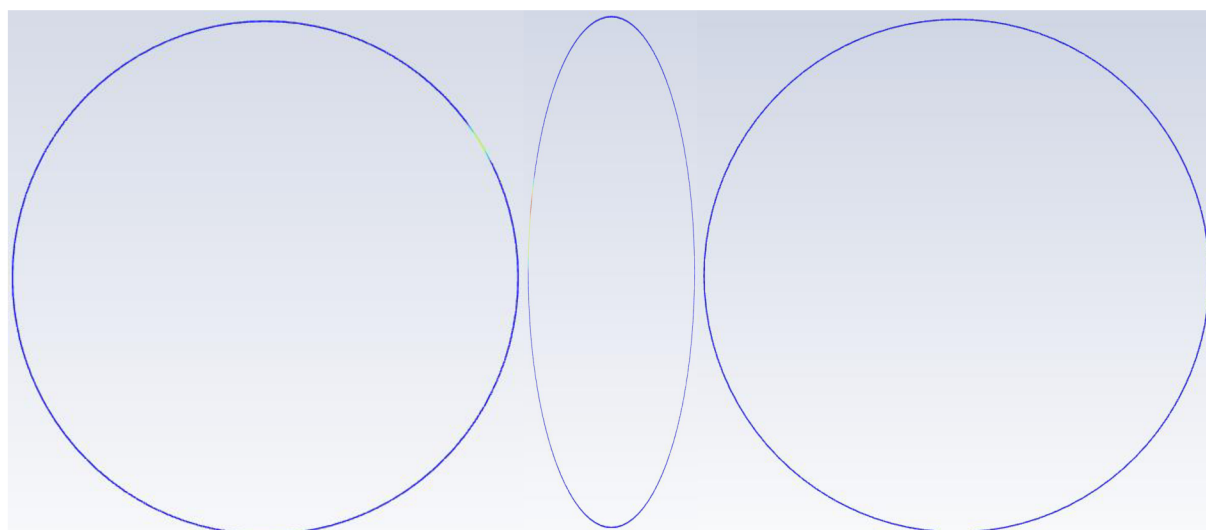




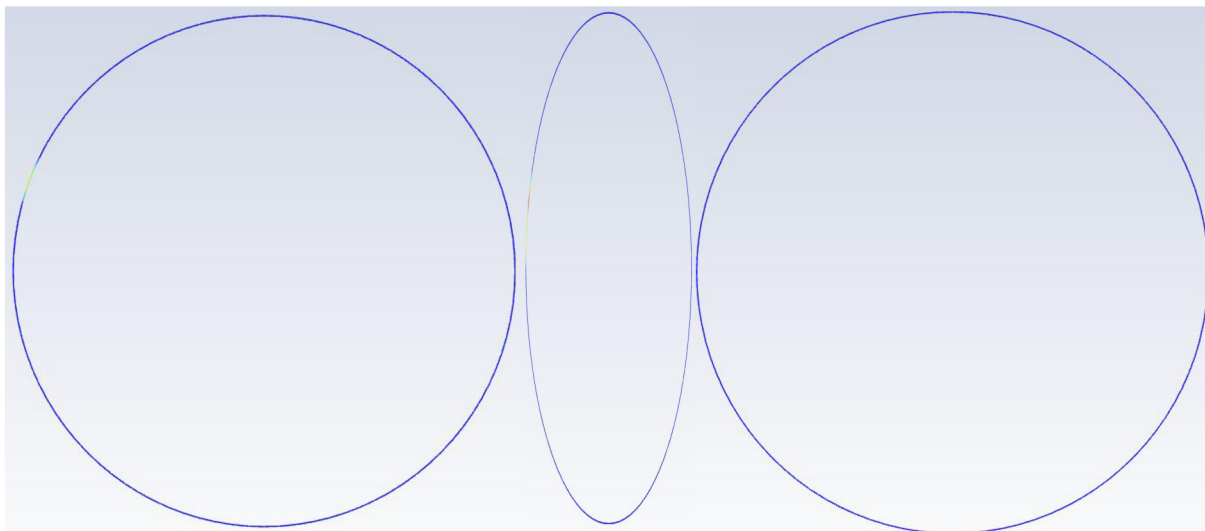
*Obr. 24 – Trajektorie částic o průměru 20  $\mu\text{m}$  v oblasti prvních dvou řad prvního svazku výměníku tepla.*



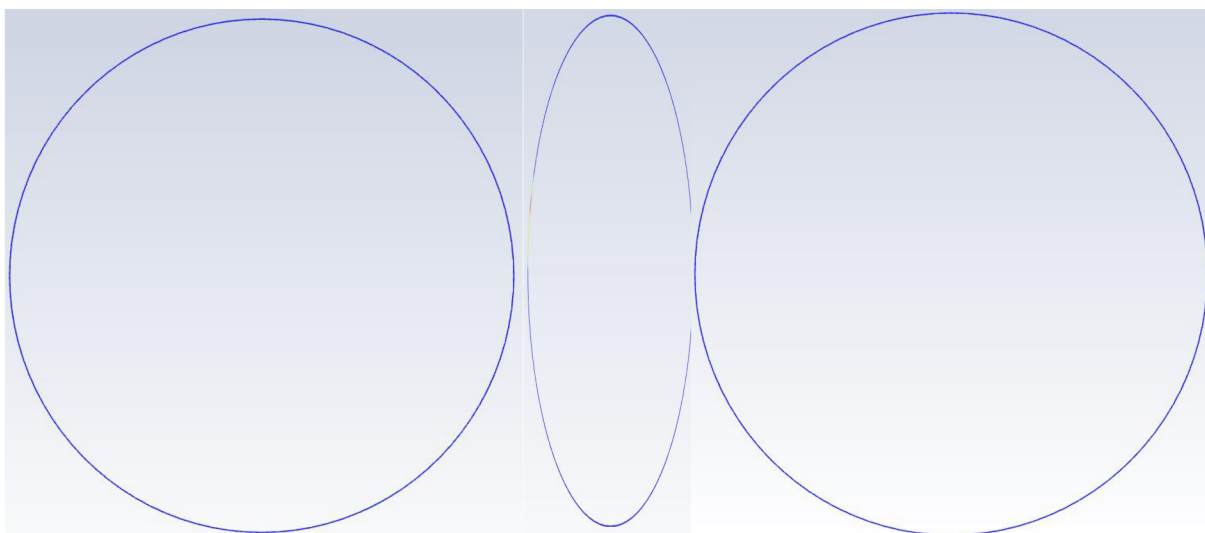
*Obr. 25 – Intenzita dopadu částic o průměru 20 μm na první dvě trubky prvních dvou řad prvního svazku (b1t1 a b1t2) výměníku tepla.*



*Obr. 26 – Intenzita dopadu částic o průměru 20 μm na první dvě trubky prvních dvou řad druhého svazku (b2t1 a b2t2) výměníku tepla*

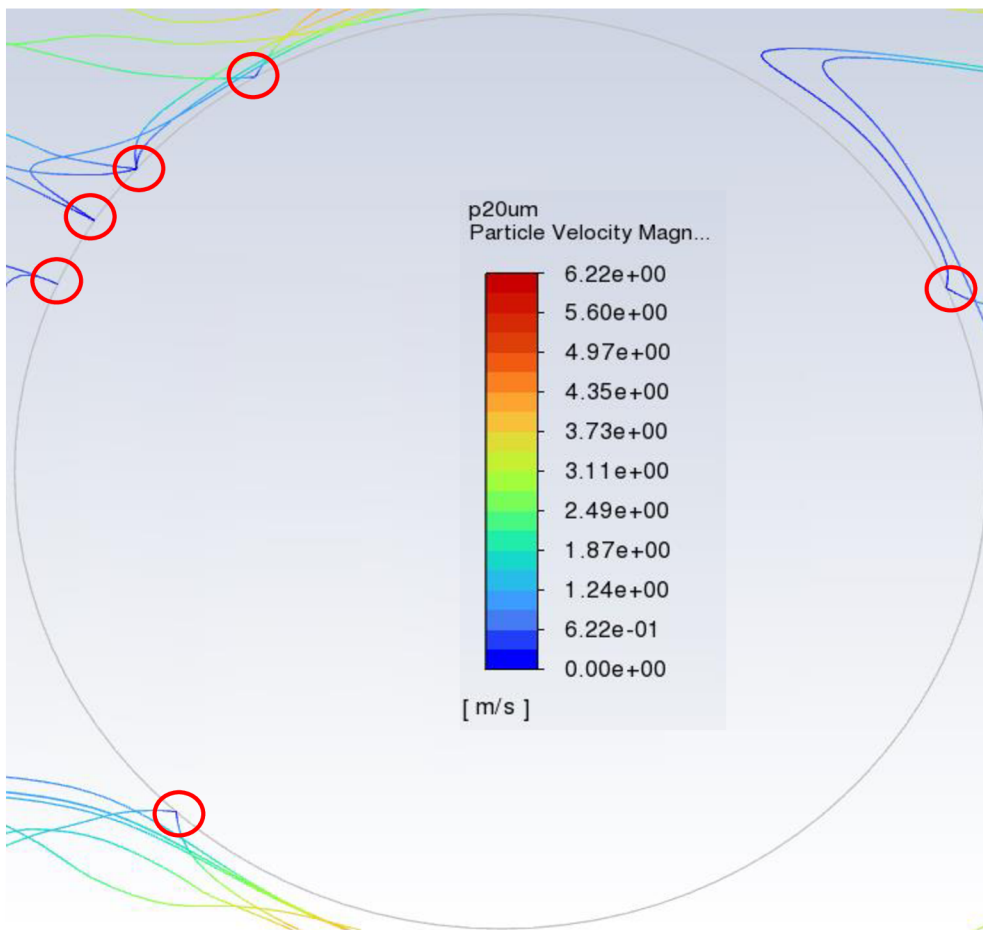


*Obr. 27 – Intenzita dopadu částic o průměru 20 μm na první dvě trubky prvních dvou řad třetího svazku (b3t1 a b3t2) výměníku tepla.*



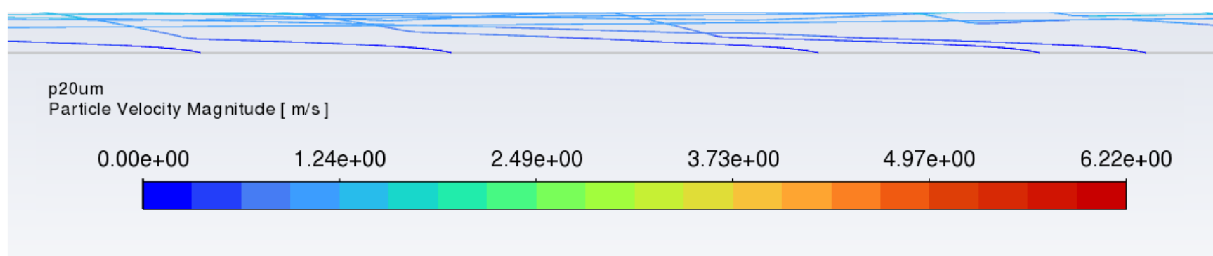
*Obr. 28 – Intenzita dopadu částic o průměru 20 μm na první dvě trubky prvních dvou řad čtvrtého svazku (b4t1 a b4t2) výměníku tepla.*

Většina částic o průměru 20 μm se po dopadu na trubku výměníku odráží, viz Obr. 29. K tomu dochází, jelikož dopadová rychlost většiny částic je větší než 0,35 m/s (viz 7.1.2).



Obr. 29 – Stav částic o průměru 20 µm po dopadu na vybranou trubku výměníku tepla

Částice hrubé frakce dopadly pouze na spodní část pláště výměníku tepla. Nejvíce docházelo k dopadu částic na plášť mimo oblasti trubkových svazků. Veškeré částice, které dopadly na spodní část pláště se uchytily, jelikož zde proudění dosahuje nižších rychlostí a tím i částice viz Obr. 30.



Obr. 30 – Trajektorie částic o průměru 20 µm v blízkosti dna hlavního kanálu výměníku

Celkem se na plášť výměníku tepla usadilo  $3,24 \cdot 10^{-3}$  mg/s částic o průměru 20 µm a na trubky výměníku tepla  $2,97 \cdot 10^{-3}$  mg/s.

## 8 Závěr

Práce se zabývala CFD simulací zanášení tuhými znečišťujícími látkami. Po úvodu do problematiky zanášení pokračuje řešerše popisem mechanismů zanášení. Existují tři režimy usazování. Prvním režimem, který je typický pro sub-mikronové částice, je difuzní režim. K zanášení dochází vlivem turbulentní difuze a difuze v mezní vrstvě. Dalším režimem je difuzně-setrvačný, ve kterém mají částice unášené turbulentními víry dostatečnou setrvačnost, aby se od víry oddělily a prošly mezní vrstvou na teplosměnnou plochu. Posledním režimem je setrvačný režim, kde částice nejsou ovlivňovány turbulentními víry díky své velké setrvačnosti. Dále byly popsány transportní mechanismy částic při zanášení, mezi něž patří např. setrvačnost částic, aerodynamický odpor, termoforézní síla, vliv turbulentních vírů.

Tyto mechanismy je možné popisovat pomocí modelů ulpívání. Viskózní model a model roztaveného podílu vyžadují znát chemické složení dopadajících částic. Navíc viskózní modely často využívají kritickou viskozitu, která je určována empiricky a její hodnoty se v různých literaturách liší. Proto byl v této práci použit model kritické rychlosti pro popis zanášení mikronovými částicemi. Pro popis zanášení sub-mikronovými částicemi byl použit přístup depoziční rychlosti, čímž bylo možné zahrnout transportní mechanismy v mezní vrstvě. Práce simulovala zanášení částicemi o průměru 20  $\mu\text{m}$  a 0,2  $\mu\text{m}$ . Tyto velikosti částic byly převzaty z práce [47], ve které se autoři zabývali zanášením částicemi vzniklými spalováním odpadu z ČOV.

Zanášení bylo simulováno v konvektivní části experimentálního spalovacího zařízení na Ústavu procesního inženýrství FSI. Z měření na tomto zařízení byly získány počáteční okrajové podmínky. Nejprve bylo simulováno zanášení v usazovací komoře. Dále bylo simulováno zanášení výměníku tepla, pro jehož vstupní okrajové podmínky sloužily výstupní hodnoty z usazovací komory. Vlastnosti spalin a tuhých částic byly převzaty z práce [47].

V této práci byly modely implementovány v prostředí ANSYS Fluent, který pracuje na základě CFD. Turbulentní proudění spalin bylo modelováno *Realizable k- $\epsilon$*  modelem. Dále byla použita funkce *Enhanced Wall Treatment*. Bylo využito UDS pro výpočet transportní rovnice pro částice o průměru 0,2  $\mu\text{m}$ . Trajektorie částic o průměru 20  $\mu\text{m}$  byla sledována použitím DPM. Model ulpívání částic o průměru 20  $\mu\text{m}$  byl implementován pomocí UDF, s využitím makra `DEFINE_DPM_EROSION`.

V usazovací komoře došlo k usazování hlavně částic o průměru 20  $\mu\text{m}$ , a to na spodní části komory a vrchní části přepážky. Částice o průměru 0,2  $\mu\text{m}$  nejvíce ulpěly v okolí vstupu a výstupu, avšak množství částic bylo oproti množství těchto částic na vstupu zanedbatelné. Ve výměníku tepla sub-mikronové částice nejvíce ulpěly na trubkách výměníku. Většina částic o průměru 20  $\mu\text{m}$  se po dopadu na trubky odrazila, jelikož částice měly příliš velkou rychlost dopadu. Naopak pokaždé došlo k ulpění na spodní část výměníku. Celkem na usazovací komoře ulpělo  $1,05 \cdot 10^{-14}$  mg/s částic o průměru 0,2  $\mu\text{m}$  a  $2,24 \cdot 10^{-4}$  mg/s částic o průměru 20  $\mu\text{m}$ . Na výměníku tepla celkem ulpělo  $4,60 \cdot 10^{-4}$  mg/s částic o průměru 0,2  $\mu\text{m}$  a 0,0622 mg/s částic o průměru 20  $\mu\text{m}$ . Jelikož se sub-mikronové částice nejvíce ulpívaly na trubkách výměníku, dá se zde očekávat s vývojem nánosu nárůst vrstvy, která bude podporovat ulpívání částic o průměru 20  $\mu\text{m}$ .

## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] LESTINA, Thomas. Heat Exchangers Fouling, Cleaning, and Maintenance. In: *Handbook of Thermal Science and Engineering* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2018 [vid. 2023-05-25], s. 1609–1641. ISBN 978-3-319-26695-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-26695-4\_24
- [2] KLEINHANS, Ulrich, Christoph WIELAND, Flemming J. FRANDSEN a Hartmut SPLIETHOFF. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2018, **68**, 65–168. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2018.02.001
- [3] TOMECZEK, Jerzy a Krzysztof WACŁAWIAK. Two-dimensional modelling of deposits formation on platen superheaters in pulverized coal boilers. *Fuel* [online]. 2009, **88**(8), 1466–1471. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2009.02.023
- [4] ZHOU, Haosheng, Peter Arendt JENSEN a Flemming Jappe FRANDSEN. Dynamic mechanistic model of superheater deposit growth and shedding in a biomass fired grate boiler. *Fuel* [online]. 2007, **86**(10), 1519–1533. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2006.10.026
- [5] DOSHI, V., H. B. VUTHALURU, R. KORBEE a J. H. A. KIEL. Development of a modeling approach to predict ash formation during co-firing of coal and biomass. *Fuel Processing Technology* [online]. 2009, **90**(9), 1148–1156. ISSN 0378-3820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2009.05.019
- [6] COUCH, Gordon. *Understanding slagging and fouling during pf combustion*. London: International Energy Agency Coal Research, 1994. IEACR, 72. ISBN 978-92-9029-240-1.
- [7] ZBOGAR, Ana, Flemming J. FRANDSEN, Peter Arendt JENSEN a Peter GLARBORG. Heat transfer in ash deposits: A modelling tool-box. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 2005, **31**(5), 371–421. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2005.08.002
- [8] WALL, T. F., S. P. BHATTACHARYA, D. K. ZHANG, R. P. GUPTA a X. HE. The properties and thermal effects of ash deposits in coal-fired furnaces. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 1993, **19**(6), 487–504. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/0360-1285(93)90002-V
- [9] *boilers-a-practical-reference-pdf.pdf*
- [10] LEE, Byeong E, Clive A J FLETCHER, Se H SHIN a Soon B KWON. Computational study of fouling deposit due to surface-coated particles in coal-fired power utility boilersq. 2002, 8.
- [11] *Kær\_2001\_Numerical investigation of ash deposition in straw-fired boilers.pdf*
- [12] CAI, Yongtie, Kunlin TAY, Zhimin ZHENG, Wenming YANG, Hui WANG, Guang ZENG, Zhiwang LI, Siah KENG BOON a Prabakaran SUBBIAH. Modeling of ash

- formation and deposition processes in coal and biomass fired boilers: A comprehensive review. *Applied Energy* [online]. 2018, **230**, 1447–1544. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2018.08.084
- [13] DUNNU, Gregory, Jörg MAIER a Günter SCHEFFKNECHT. Ash fusibility and compositional data of solid recovered fuels. *Fuel* [online]. 2010, **89**(7), 17th International Symposium on Alcohol Fuels, 1534–1540. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2009.09.008
- [14] PINTANA, Pakamon a Nakorn TIPPAYAWONG. Predicting Ash Deposit Tendency in Thermal Utilization of Biomass. *Engineering Journal* [online]. 2016, **20**(5), 15–24. ISSN 01258281. Dostupné z: doi:10.4186/ej.2016.20.5.15
- [15] TORTOSA MASÍA, A. A. Characterisation and prediction of deposits in biomass co-combustion [online]. 2010 [vid. 2021-12-08]. Dostupné z: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A9be04db0-2476-4afa-ab1a-294c266228c0>
- [16] JENSEN, Peter Arendt, Muhammad Shafique BASHIR, Stig WEDEL, Flemming FRANDSEN, Johan WADENBÄCK, Søren Thaaning PEDERSEN a Kim DAM-JOHANSEN. Final report: Characterization and quantification of deposits build up and removal in straw suspension fired boilers. nedatováno, 217.
- [17] KÆR, Søren Knudsen. *Numerical investigation of ash deposition in straw-fired boilers: using CFD as the framework for slagging and fouling predictions: Ph.D. thesis*. Aalborg, 2001. Ph.D. Thesis. Aalborg University, Institute of Energy Technology.
- [18] GARCÍA PÉREZ, Manuel, Esa VAKKILAINEN a Timo HYPPÄNEN. Unsteady CFD analysis of kraft recovery boiler fly-ash trajectories, sticking efficiencies and deposition rates with a mechanistic particle rebound-stick model. *Fuel* [online]. 2016, **181**, 408–420. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2016.05.004
- [19] GUHA, Abhijit. Transport and Deposition of Particles in Turbulent and Laminar Flow. *Annual Review of Fluid Mechanics* [online]. 2008, **40**(1), 311–341. ISSN 0066-4189, 1545-4479. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.fluid.40.111406.102220
- [20] HAUGEN, Nils a STEINAR KRAGSET. Particle impaction on a cylinder in a crossflow as function of Stokes and Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics* [online]. 2010, **661**, 239–261. Dostupné z: doi:10.1017/S0022112010002946
- [21] WESSEL, R. A. a J. RIGHI. Generalized Correlations for Inertial Impaction of Particles on a Circular Cylinder. *Aerosol Science and Technology* [online]. 1988, **9**(1), 29–60. ISSN 0278-6826. Dostupné z: doi:10.1080/02786828808959193
- [22] BAXTER, Larry L. Ash deposition during biomass and coal combustion: A mechanistic approach. *Biomass and Bioenergy* [online]. 1993, **4**(2), Biomass in Combustion: The Challenge of Biomass?, 85–102. ISSN 0961-9534. Dostupné z: doi:10.1016/0961-9534(93)90031-X

- [23] *Ansys Help* [online]. [vid. 2022-05-14]. Dostupné z: [https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/main\\_page.html](https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/main_page.html)
- [24] KLEINSTREUER, Clement a Yu FENG. Computational Analysis of Non-Spherical Particle Transport and Deposition in Shear Flow With Application to Lung Aerosol Dynamics—A Review. *Journal of Biomechanical Engineering* [online]. 2013, **135**(2), 021008. ISSN 0148-0731, 1528-8951. Dostupné z: doi:10.1115/1.4023236
- [25] WANG, D. a L. -S. FAN. 2 - Particle characterization and behavior relevant to fluidized bed combustion and gasification systems. In: Fabrizio SCALA, ed. *Fluidized Bed Technologies for Near-Zero Emission Combustion and Gasification* [online]. B.m.: Woodhead Publishing, 2013 [vid. 2022-02-17], Woodhead Publishing Series in Energy, s. 42–76. ISBN 978-0-85709-541-1. Dostupné z: doi:10.1533/9780857098801.1.42
- [26] PRECISEISH. *The Magnus Effect* [online]. [vid. 2022-02-24]. Dostupné z: <http://www.preciseish.com/2013/05/the-magnus-effect.html>
- [27] WALSH, Peter M., Alan N. SAYRE, David O. LOEHDEN, Larry S. MONROE, János M. BEÉR a Adel F. SAROFIM. Deposition of bituminous coal ash on an isolated heat exchanger tube: Effects of coal properties on deposit growth. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 1990, **16**(4), 327–345. ISSN 03601285. Dostupné z: doi:10.1016/0360-1285(90)90042-2
- [28] WANG, Huafeng a John N HARB. MODELING OF ASH DEPOSITION IN LARGE-SCALE COMBUSTION FACILITIES BURNING PULVERIZED COAL. nedatováno, 16.
- [29] LEE, F C C a F C LOCKWOOD. Modelling ash deposition in pulverized coal-fired applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1999, 16.
- [30] LEE, F. C. C. a F. C. LOCKWOOD. Modelling ash deposition in pulverized coal-fired applications. *Progress in Energy and Combustion Science* [online]. 1999, **25**(2), 117–132. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-1285(98)00008-2
- [31] LI, Jinbo, Wenjing DU a Lin CHENG. Numerical simulation and experiment of gas-solid two phase flow and ash deposition on a novel heat transfer surface. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2017, **113**, 1033–1046. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.10.198
- [32] LI, Amy a Goodarz AHMADI. Computer Simulation of Deposition of Aerosols in a Turbulent Channel Flow with Rough Walls. *Aerosol Science and Technology* [online]. 1993, **18**(1), 11–24. ISSN 0278-6826. Dostupné z: doi:10.1080/02786829308959581
- [33] BRACH, Raymond M. a Patrick F. DUNN. A Mathematical Model of the Impact and Adhesion of Microspheres. *Aerosol Science and Technology* [online]. 1992, **16**(1), 51–64. ISSN 0278-6826. Dostupné z: doi:10.1080/02786829208959537
- [34] WALL, Stephen, Walter JOHN, Hwa-Chi WANG a Simon L. GOREN. Measurements of Kinetic Energy Loss for Particles Impacting Surfaces. *Aerosol Science and Technology*



- [online]. 1990, **12**(4), 926–946. ISSN 0278-6826. Dostupné z: doi:10.1080/02786829008959404
- [35] KONSTANDOPOULOS, Athanasios G. Particle sticking/rebound criteria at oblique impact. *Journal of Aerosol Science* [online]. 2006, **37**(3), 292–305. ISSN 0021-8502. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaerosci.2005.05.019
- [36] KONSTANDOPOULOS, Athanasios G. Particle sticking/rebound criteria at oblique impact. *Journal of Aerosol Science* [online]. 2006, **37**(3), 292–305. ISSN 00218502. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaerosci.2005.05.019
- [37] XIE, Jun, Ming DONG, Sufen LI, Yaokui MEI a Yan SHANG. An experimental study of fly ash particle oblique impact with stainless surfaces. *Journal of Aerosol Science* [online]. 2018, **123**, 27–38. ISSN 0021-8502. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaerosci.2018.06.001
- [38] KÆR, S. K., L. A. ROSENDAHL a L. L. BAXTER. Towards a CFD-based mechanistic deposit formation model for straw-fired boilers. *Fuel* [online]. 2006, **85**(5), 833–848. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2005.08.016
- [39] TSUJI, Yutaka, Takao OSHIMA a Yoshinobu MORIKAWA. Numerical Simulation of Pneumatic Conveying in a Horizontal Pipe. *KONA Powder and Particle Journal* [online]. 1985, **3**, 38–51. Dostupné z: doi:10.14356/kona.1985009
- [40] SOMMERFELD, Martin a Norbert HUBER. Experimental analysis and modelling of particle-wall collisions. *International Journal of Multiphase Flow* [online]. 1999, **25**(6), 1457–1489. ISSN 0301-9322. Dostupné z: doi:10.1016/S0301-9322(99)00047-6
- [41] LEE, Byeong E., Clive A. J. FLETCHER, Se H. SHIN a Soon B. KWON. Computational study of fouling deposit due to surface-coated particles in coal-fired power utility boilers. *Fuel* [online]. 2002, **81**(15), 2001–2008. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/S0016-2361(02)00127-8
- [42] VAN BEEK, M. C., Camilo C. M. RINDT, Johan G. WIJERS a Anton A. VAN STEENHOVEN. Rebound characteristics for 50- $\mu\text{m}$  particles impacting a powdery deposit. *Powder Technology* [online]. 2006, **165**(2), 53–64. ISSN 0032-5910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2006.03.008
- [43] YANG, Xin, Hao ZHOU a Hao WU. CFD modelling of biomass ash deposition under multiple operation conditions using a 2D mass-conserving dynamic mesh approach. *Fuel* [online]. 2022, **316**, 123250. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2022.123250
- [44] WANG, Fei-Long, Ya-Ling HE, Zi-Xiang TONG a Song-Zhen TANG. Real-time fouling characteristics of a typical heat exchanger used in the waste heat recovery systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2017, **104**, 774–786. ISSN 0017-9310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.08.112
- [45] RUSHDI, A., R. GUPTA, A. SHARMA a D. HOLCOMBE. Mechanistic prediction of ash deposition in a pilot-scale test facility. *Fuel* [online]. 2005, **84**(10), Special Issue Dedicated to Professor Terry Wall, 1246–1258. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2004.08.027

- [46] BORELLO, Domenico, Paolo VENTURINI, Franco RISPOLI a Saavedra G. Z. RAFAEL. Prediction of multiphase combustion and ash deposition within a biomass furnace. *Applied Energy* [online]. 2013, **101**, Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 413–422. ISSN 0306-2619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2012.04.031
- [47] MU, Lin, Liang ZHAO a Hongchao YIN. Modelling and measurements of the characteristics of ash deposition and distribution in a HRSG of wastewater incineration plant. *Applied Thermal Engineering* [online]. 2012, **44**, 57–68. ISSN 1359-4311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2012.03.039
- [48] HAN, Zhimin, Zhiming XU a Xiaoyan YU. CFD modeling for prediction of particulate fouling of heat transfer surface in turbulent flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2019, **144**, 118428. ISSN 0017-9310. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.07.078
- [49] CHE SIDIK, Nor Azwadi, Siti Nurul Akmal YUSOF, Yutaka ASAKO, S. MOHAMED a Arif AZIZ. A Short Review on RANS Turbulence Models. *CFD Letters* [online]. 2020, **12**, 83–96. Dostupné z: doi:10.37934/cfdl.12.11.8396
- [50] ZHANG, Z. a Q. CHEN. Comparison of the Eulerian and Lagrangian methods for predicting particle transport in enclosed spaces. *Atmospheric Environment* [online]. 2007, **41**(25), 5236–5248. ISSN 13522310. Dostupné z: doi:10.1016/j.atmosenv.2006.05.086
- [51] WACŁAWIAK, Krzysztof a Sylwester KALISZ. A practical numerical approach for prediction of particulate fouling in PC boilers. *Fuel* [online]. 2012, **97**, 38–48. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2012.02.007
- [52] STROUHAL, Jiří, Tomas JURENA a Z. JEGLA. ANALYSIS OF INFLUENCE OF MODEL INPUT PARAMETERS ON ASH FOULING RATE PREDICTED BY CFD [online]. 2020. Dostupné z: doi:10.21495/5896-3-468
- [53] BOJANOVSKÝ, Jiří. *Spalování tuhých paliv v rotační peci a vliv jejich složení na tvorbu znečišťujících látek* [online]. B.m., 2022 [vid. 2023-05-26]. Vysoké učení technické v Brně. Dostupné z: <https://theses.cz/id/6ivgv0/>
- [54] WEBER, Roman, Natalia SCHAFFEL-MANCINI, Marco MANCINI a Tomasz KUPKA. Fly ash deposition modelling: Requirements for accurate predictions of particle impaction on tubes using RANS-based computational fluid dynamics. *Fuel* [online]. 2013, **108**, 586–596. ISSN 0016-2361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2012.11.006
- [55] SAFI'I, Muhamad. *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. 2020. ISBN 978-0-07-338032-2.
- [56] MEYER, Christo. Targeting a Specific  $y^+$  Value for your Turbulent Flow CFD Simulation (Part 2). *SIMTEQ Engineering* [online]. 12. prosinec 2019 [vid. 2023-05-25]. Dostupné z: <https://simteq.co.za/blog/targeting-a-specific-y-value-for-your-turbulent-flow-cfd-simulation-part-2/>

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$R_f$	index zanášení	-
$\eta_{imp}$	účinností dopadu	-
$St$	Stokesovo číslo	-
$N_{imp}$	množství částic dopadajících na povrch	-
$N_{tot}$	celkové množství částic mířící k povrchu	-
$u^*$	třecí rychlost	$m \cdot s^{-1}$
$d_p$	průměr částice	$m$
$F_D$	aerodynamický odpor	$N$
$A$	Průtočná plocha	$m^2$
$C_C$	Stokes-Cunninghamův korekční faktor	-
$C_D$	odporový koeficient	-
$v$	rychlost proudu	$m \cdot s^{-1}$
$Re$	Reynoldsovo číslo	-
$Re_p$	Reynoldovo číslo částice	-
$\vec{F}_{th}$	termoforézní síla	$N$
$T$	lokální teplota spalin	$K$
$\nabla T$	teplotní gradient	$K \cdot m^{-1}$
$D_{T,p}$	termoforézní koeficient	$N \cdot m$
$K_n$	Knudsenovo číslo	-
$K$	poměr tepelné vodivosti spalin a tepelné vodivosti částice	-
$T_g$	teplota spalin	$K$
$r$	měrná plynová konstanta	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$p$	tlak	$Pa$
$S_h$	Sherwoodovo číslo	-
$\vec{F}_L$	Saffmanův vztlak	$N$
$k$	empirická konstanta	-
$\vec{u}$	rychlost fáze tekutiny	$m \cdot s^{-1}$
$\vec{u}_p$	rychlost částice	$m \cdot s^{-1}$
$\vec{F}_M$	Magnusova síla	$N$
$A_p$	plocha povrchu částice	$m^2$
$C_{RL}$	rotační součinitel vztlaku	-

$\vec{V}$	relativní rychlost tekutina-částice	$m \cdot s^{-1}$
$P_{stick}$	pravděpodobnost ulpění	-
$f$	hmotnostní podíl kapalné fáze	-
$v_{kr}$	kritická rychlost	$m \cdot s^{-1}$
$v_t$	tečná složka rychlosti částice při dopadu	$m \cdot s^{-1}$
$v_n$	normálová složka rychlosti částice při dopadu	$m \cdot s^{-1}$
$E_t$	kinetická energie tečné složky pohybu bezprostředně před dopadem	$J$
$E_n$	normálová adhezní energie	$J$
$E^*$	modul pružnosti v tahu	$Pa$
$G^*$	modul pružnosti ve smyku	$Pa$
$u_d$	depoziční rychlost	$m \cdot s^{-1}$
$u_d^+$	bezrozměrná depoziční rychlost	-
$\dot{m}_r$	intenzita odstranění nánosu	$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$
$Y_d$	hmotnostní zlomek částic o průměru větším než $d_p$	-
$d_m$	střední průměr částic	$m$
$p_g$	tlak tekutiny	$Pa$
$H_g$	měrná entalpie tekutiny	$J \cdot kg^{-1}$
$c_{p,g}$	měrná tepelná kapacita tekutiny za konstantního tlaku	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$k$	turbulentní kinetická energie	$m^2 \cdot s^{-2}$
$u_{d,th}^+$	bezrozměrná termoforézní depoziční rychlost	-
$m_p$	hmotnost částice	$kg$
$u_{d,tu}^+$	bezrozměrná turbulentní depoziční rychlost	-
$L_l^+$	bezrozměrná vztlaková síla	-
$k_s^+$	bezrozměrná výška drsnosti	-
$d_p^+$	bezrozměrný průměr částice	-
$k_s$	drsnost povrchu	$m$
$u_{d,tot}^+$	celková bezrozměrná depoziční rychlost	-
$\dot{m}_{d,s}$	intenzita dopadu částic na stěnu	$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-2}$
$C_p$	koncentrace částic	$kg \cdot m^{-3}$
$\dot{m}_{částice}$	hmotnostní tok částic	$kg \cdot s^{-1}$
$\dot{m}_{tekutina}$	hmotnostní tok tekutiny	$kg \cdot s^{-1}$
$F_{S,n}$	velikost normálové složky elastické odrazové síly	$N$
$F_{VW}$	velikost Van der Waalsovy síly	$N$

$F_{g,n}$	velikost normálové složky gravitační síly	$N$
$u_{p,n}$	velikost normálové složky dopadové rychlosti částice	$m \cdot s^{-1}$
$K_S$	konstanta úměrnosti v závislosti na elasticitě částice a zanášeného povrchu	$kg \cdot s^{-0,8} \cdot m^{-2,2}$
$d_{ref}$	referenční průměr částice	$m$
$B$	molekulární interakční konstanta	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
$\vec{g}$	tíhové zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
$\vec{n}$	normálový vektor stěny orientovaný dovnitř proudu tekutiny	-
$S_{\Phi_k}$	uživatelé dodaný zdrojový člen	jednotka
$J$	difúzní koeficient	$m^2 \cdot s^{-1}$
$D_B$	difúzní koeficient pro difúzi vlivem Brownova pohybu	$m^2 \cdot s^{-1}$
$k_B$	Boltzmannova konstanta	$J \cdot K^{-1}$
$\overline{v'^2}$	efektivní hodnota místní rychlosti fluktuace kolmé ke stěně	$m^2 \cdot s^{-2}$
$\dot{m}_{d,Vdep}$	intenzita usazování částic na objem buňky	$kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-3}$
$S_{dep}$	velikost plochy buňky dopadu částice	$m^2$
$V_{dep}$	objem buňky dopadu částice	$m^3$
$y^+$	bezrozměrná vzdálenost od stěny	-
$x$	molární zlomek složky spalin	-
$M$	molární hmotnost složky spalin	$kg \cdot mol^{-1}$
$I$	intenzita turbulence	-
$Re_{in}$	Reynoldsovo číslo na vstupu do domény	-
$\dot{m}_{p0,2,in}$	vstupní hmotnostní toky částic o velikosti 0,2 $\mu m$	$kg \cdot s^{-1}$
$\dot{m}_{p20,in}$	vstupní hmotnostní toky částic o velikosti 20 $\mu m$	$kg \cdot s^{-1}$
$\tau^+$	bezrozměrný relaxační čas částice	-
$\vartheta$	kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\tau_p$	relaxační čas částice	$s$
$\rho_p$	hustota částice	$kg \cdot m^{-3}$
$\lambda$	střední volná dráha tekutiny	$m$
$\varepsilon$	rychlost turbulentní disipace	$m^2 \cdot s^{-3}$
$\vec{\Omega}$	relativní úhlová rychlost kapalina-částice	$rad \cdot s^{-1}$
$\theta_{kr}$	kritický úhel dopadu	$rad$
$\mu_{kr}$	kritická viskozita	$Pa \cdot s^{-1}$
$\mu_{ref}$	referenční viskozita	$Pa \cdot s^{-1}$

$\mu$	dynamická viskozita složky spalin	$Pa \cdot s^{-1}$
$\mu^*$	efektivní součinitel tření	-
$\beta$	efektivní koeficient kontaktního poloměru	-
$\lambda_g$	tepelná vodivost tekutiny	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\Phi_k$	obecná skalární veličina	jednotka
$\Gamma_k$	uživatелеm dodaný difuzní koeficient	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
$\varepsilon_p$	vířivá difuze	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\vartheta_t$	turbulentní viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
$\delta$	vzdálenost mezi částicí a povrchem	$m$

<b>Zkratka</b>	<b>Význam</b>
CFD	výpočtová dynamika tekutin
RMS	efektivní hodnota
ČOV	čistírna odpadních vod
DPM	<i>Discrete Phase Model</i>
DRW	<i>Discrete Random Walk</i>
UDF	uživatelsky definovaná funkce
UDS	uživatelsky definovaný skalár

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – Změna tepelného výkonu vzhledem k nárůstu nánosu v čase. ....	16
Obr. 2 – Tvorba popílku při spalování [10]. ....	17
Obr. 3 – Rozdělení režimů zanášení (převzato z a upraveno [11]). ....	20
Obr. 4 – Saffmanův vztlak [24]. ....	23
Obr. 5 – Magnusův jev [26]. ....	24
Obr. 6 – Závislost pravděpodobnosti ulpění částice na roztaveném podílu [12]. ....	26
Obr. 7 – Závislost kritické rychlosti na velikosti částice (převzato z [34] a upraveno). ....	27
Obr. 8 – Znázornění vlivu nerovností povrchu na usazování částic nesených proudem plynu v horizontálním kanálu. Převzato z [39] a upraveno. ....	28
Obr. 9 – Bimodální rozložení velikosti. Převzato z [11] a upraveno. ....	30
Obr. 10 – Vývojový diagram použitého modelu. ....	31
Obr. 11 – Schéma sestavy odvodu spalin. Převzato z [52] a upraveno. ....	37
Obr. 12 – Geometrie usazovací komory (modrými šipkami je vyznačen vstup, červenými výstup). ....	38
Obr. 13 – Geometrie usazovací komory a 2D řez výměníku tepla ....	38
Obr. 14 – Rychlostní profil na řezu vedeného středem vstupu usazovací komory ....	46
Obr. 15 – Zanášení usazovací komory částicemi o průměru 0,2 $\mu\text{m}$ ....	46
Obr. 16 – Zanášení spodní části přepážky usazovací komory částicemi o průměru 0,2 $\mu\text{m}$ ...	47
Obr. 17 – Zanášení spodní části usazovací komory částicemi o průměru 0,2 $\mu\text{m}$ ....	47
Obr. 18 – Trajektorie částic o průměru 20 $\mu\text{m}$ v usazovací komoře (pohled ze strany výstupu). ....	48
Obr. 19 – Trajektorie částic o průměru 20 $\mu\text{m}$ v usazovací komoře (pohled z boční strany). .	49
Obr. 20 – Intenzita dopadu částic o průměru 0,2 $\mu\text{m}$ na první dva trubkové svazky. ....	50
Obr. 21 – Turbulentní víry za trubkami výměníku tepla. ....	50
Obr. 22 – Teplotní pole v oblasti 1. a 2. svazku trubek výměníku tepla. ....	51
Obr. 23 – Teplotní pole v oblasti 3. a 4. svazku trubek výměníku tepla. ....	51
Obr. 24 – Trajektorie částic o průměru 20 $\mu\text{m}$ v oblasti prvních dvou řad prvního svazku výměníku tepla. ....	52
Obr. 25 – Intenzita dopadu částic o průměru 20 $\mu\text{m}$ na první dvě trubky prvních dvou řad prvního svazku (b1t1 a b1t2) výměníku tepla. ....	53
Obr. 26 – Intenzita dopadu částic o průměru 20 $\mu\text{m}$ na první dvě trubky prvních dvou řad druhého svazku (b2t1 a b2t2) výměníku tepla ....	53
Obr. 27 – Intenzita dopadu částic o průměru 20 $\mu\text{m}$ na první dvě trubky prvních dvou řad třetího svazku (b3t1 a b3t2) výměníku tepla. ....	54

Obr. 28 – Intenzita dopadu částic o průměru 20 μm na první dvě trubky prvních dvou řad čtvrtého svazku (b4t1 a b4t2) výměníku tepla. ....	54
Obr. 29 – Stav částic o průměru 20 μm po dopadu na vybranou trubku výměníku tepla.....	55
Obr. 30 – Trajektorie částic o průměru 20 μm v blízkosti dna hlavního kanálu výměníku.....	55



## SEZNAM TABULEK

Tab. 1 – Sledované parametry výpočtových sítí usazovací komory při studii vlivu sítě.....	40
Tab. 2 – Vlastnosti spalin.....	41
Tab. 3 – Vlastnosti tuhých částic .....	41
Tab. 4 – Okrajové podmínky vstupu spalin do usazovací komory .....	42
Tab. 5 – Okrajové podmínky vstupu tuhých částic – usazovací komora.....	42
Tab. 6 – Okrajové podmínky vstupu spalin – výměník tepla.....	43
Tab. 7 – Okrajové podmínky vstupu tuhých částic – výměník tepla .....	43
Tab. 8 – Okrajové podmínky na stěnách výměníku tepla .....	44
Tab. 9 – Hmotnostní toky usazených částic v usazovací komoře.....	45
Tab. 10 – Hmotnostní toky usazených částic ve výměníku tepla .....	49