



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

MODELOVÁNÍ PROUDĚNÍ VZDUCHU VE SPALOVACÍ KOMOŘE ZKG

MODELLING OF AIR FLOW IN COMBUSTION CHAMBER ZKG

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jan KRIŠPÍN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Michal ŠPILÁČEK

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Krišpín

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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 bakalářské práce:

Modelování proudění vzduchu ve spalovací komoře ZKG

v anglickém jazyce:

Modelling of air flow in combustion chamber ZKG

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerše důležitosti charakteru proudění vzduchu ve spalovací komoře a jeho zkoumání v zadané komoře pomocí metody konečných prvků.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše o vlivu proudění vzduchu ve spalovací komoře. Vytvoření modelu spalovací komory a modelu proudění vzduchu v prázdné komoře.

Seznam odborné literatury:

DLOUHÝ, Tomáš. Výpočty kotlů a spalínových výměníků. ISBN: 978-80-0103-757-7

KUNEŠ, Josef. Základy modelování. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989, 263 s. ISBN 80-030-0147-1.

HOLOUBEK, Dušan. Spařovací zariadenia, výmenníky tepla a kotly. 1. vyd. ISBN 80-7099-832-6

SKÁLA, Zdeněk. Termokinetika spalování.

KOZUBKOVÁ, Milada. Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX [online]

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Špiláček

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Náplní předkládané práce je popis chemických a fyzikálních vlastností biomasy, metod energetických přeměn biomasy, procesů probíhajících při spalování biomasy a především proudění spalovacího vzduchu. Součástí této práce je modelování proudění spalovacího vzduchu spalovací komorou pomocí metody konečných prvků s následným vyhodnocením a návrhem konstrukčních úprav komory.

ABSTRACT

The subject of the submitted bachelor thesis is a description of chemical and physical behavior of biomass, methods of energetic transformation of biomass, processes in a combustion chamber during burning and primarily flowing of combustion air. A part of this thesis is a modelling of an air flow in the combustion chamber using the finite elements method with an evaluation and a suggestion of construction changes of the combustion chamber.

Klíčová slova

biomasa, spalování, proudění, spalovací vzduch, primární vzduch, sekundární vzduch

Key words

biomass, burning, flowing, combustion air, primary airflow, secondary airflow

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KRIŠPÍN, Jan. 2015. *Modelování proudění vzduchu ve spalovací komoře ZKG*. Brno. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. 51 s. Vedoucí práce Ing. Michal ŠPILÁČEK.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svoji bakalářskou práci na téma *Modelování proudění vzduchu ve spalovací komoře ZKG* zpracoval samostatně. Veškeré prameny a zdroje informací, které jsem použil k sepsání této práce, jsou uvedeny v seznamu použitých pramenů literatury.

Datum

Jan Krišpín

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu Ing. Michalu Špiláčkovi za odborný dohled, cenné rady, předávání svých zkušeností a především za velmi příjemnou spolupráci, která mi byla v mnohém velkým přínosem. Dále děkuji Ing. Tomáši Pařízkovi, Ph.D. za odbornou radu a povzbuzení. Rovněž děkuji svým kolegům a blízkým za přátelskou atmosféru a podporu při práci.

OBSAH

ABSTRAKT	3
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ.....	5
PODĚKOVÁNÍ.....	6
OBSAH	7
ÚVOD	9
1 BIOMASA	10
1.1 Rozdělení biomasy	10
1.1.1 Rostlinná biomasa	10
1.1.2 Živočišná biomasa.....	11
1.1.3 Odpadní biomasa.....	11
1.2 Parametry dřevní biomasy.....	11
1.2.1 Energetické parametry.....	11
1.2.2 Parametry určující užitečný obsah	11
1.2.3 Parametry určující výsledné nežádoucí produkty spalování	12
1.3 Způsoby energetické přeměny	13
1.3.1 Spalování.....	13
1.3.2 Zplyňování	15
1.3.3 Pyrolýza.....	15
1.4 Popel.....	15
1.4.1 Charakteristika popelu.....	15
1.4.2 Termoplastické vlastnosti popelu.....	16
1.4.3 Důsledky přítomnosti popelu	16
1.5 Spaliny.....	16
1.5.1 Vlastnosti spalin	16
1.5.2 Důsledky tvorby spalin.....	17
2 SPALOVÁNÍ V ROŠTOVÉM OHNIŠTI	18
2.1. Konstrukce kotle pro přímé spalování	18
2.2 Primární vzduch	19
2.2.1 Charakteristika primárního vzduchu	19
2.2.2 Vliv primárního vzduchu na spalovací proces	19
2.2.3 Negativní vlivy spojené s prouděním primárního vzduchu	19
2.3 Sekundární vzduch	20
2.3.1 Charakteristika sekundárního vzduchu	20
2.3.2 Vliv sekundárního vzduchu na spalovací proces	20
2.3.3 Negativní vlivy spojené s prouděním sekundárního vzduchu.....	20

3	TECHNICKÉ PARAMETRY ŘEŠENÉHO ZAŘÍZENÍ	22
3.1	Popis zařízení	22
3.2	Schématický nákres zařízení	23
4	ANALÝZA PROUDĚNÍ STUDENÉHO VZDUCHU POMOCÍ CFD	24
4.1	Tvorba geometrie	24
4.2	Tvorba výpočtové sítě	24
4.3	Definování okrajových podmínek pro laminární proudění	28
4.4	Výsledky numerického řešení laminárního proudění studeného vzduchu.....	29
4.4.1	Rozložení tlaku ve spalovací komoře.....	29
4.4.2	Rozložení rychlosti proudění ve spalovací komoře	31
4.5	Definování okrajových podmínek pro turbulentní proudění.....	36
4.6	Úprava původního výpočetního modelu	36
4.7	Výsledky numerického řešení turbulentního proudění studeného vzduchu.....	36
4.7.1	Rozložení tlaku ve spalovací komoře.....	36
4.7.2	Rozložení rychlosti proudění ve spalovací komoře	38
4.8	Analýza získaných výsledků	43
4.9	Návrh úprav konstrukce	44
	ZÁVĚR.....	46
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	47
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	49
	SEZNAM OBRÁZKŮ	50

ÚVOD

Tématem mé práce je problematika proudění vzduchu spalovací komorou na biomasu. Biomasa je jednou z možností alternativních energií, která zejména v poslední době znovu získává svou přízeň veřejnosti, ať už jako primární zdroj tepla či záložní. Velkou výhodou je snadná dostupnost paliva a nezávislost na dodávkách paliva ze zahraničí, což je podpořeno nynějšími obavami ze závislosti na ruském plynu. Oblíbenost kotlů na spalování biomasy je spojená se zvyšováním nároků na jejich provoz a to jak ze strany veřejnosti, tak zejména ze strany Evropské Unie. Těmito požadavky jsou především zvyšování účinnosti a snižování emisních limitů. Z těchto důvodů je zapotřebí optimalizovat procesy probíhající uvnitř kotlů na biomasu, které jsou silně ovlivňovány právě prouděním vzduchu.

Analýza proudění vzduchu v zadané spalovací komoře je provedena výpočtem metodou konečných prvků pomocí programu COMSOL Multiphysics. Na základě této analýzy jsou vyhodnoceny výsledky výpočtu a probráno chování proudění vzduchu. Výsledkem těchto poznatků je návrh možných úprav spalovací komory.

1 BIOMASA

Biomasa je obnovitelný zdroj energie tvořený organickými částmi bakterií, rostlin, hub a živočichů. V těchto organických částech je koncentrována energie slunečního záření. Sluneční záření se na energii přeměňuje prostřednictvím fotosyntézy probíhající v rostlinných tělech. Tato energie zůstává v tělech rostlin nebo je konzumací převedena do těl živočichů či rozkládáním do těl hub a bakterií.

Biomasa pro účely spalování je ve smyslu [13] definována jako produkt, který je tvořen zcela nebo zčásti z rostlinného materiálu pocházejícího ze zemědělství nebo lesnictví a který lze použít jako palivo za účelem získání jeho energetického obsahu, a dále uvedený odpad použitý jako palivo:

- a) rostlinný odpad ze zemědělství nebo lesnictví
- b) rostlinný odpad z potravinářského průmyslu, pokud se znovu využije vyrobené teplo
- c) rostlinný odpad z výroby čerstvé vlákniny a z výroby papíru z buničiny, pokud se spaluje v místě výroby a vzniklé teplo se využije
- d) korkový odpad
- e) dřevný odpad s výjimkou dřevného odpadu, který může obsahovat halogenované organické sloučeniny nebo těžké kovy v důsledku ošetření látkami na ochranu dřeva nebo nátěrovými hmotami, zahrnující především dřevné odpady tohoto typu pocházející z odpadů ze stavebnictví a z demolic

Charakteristickým rysem biomasy je chemické složení tvořené především uhlíkem, vodíkem, kyslíkem, dusíkem a sírou. Tyto prvky spolu s dalšími (např. fosfor a chlór) tvoří složitější sloučeniny a základní elementy všech živých organismů - bílkovin, sacharidů a lipidů. Jednotlivé druhy biomasy jsou rozlišitelné dle chemického složení.

Energie koncentrovaná v biomase je v lidském zájmu již od pradávna a dlouhou dobu je primárním zdrojem tepelné energie. Tepelnou energii získáváme prostřednictvím spalování. Tepelná energie se využívá buď přímo, nebo se dále přeměňuje na energii mechanickou či elektrickou.

Je zřejmé, že biomasa je snadno dostupnou surovinou k výrobě energie, nicméně je náročnější ke zpracování než fosilní paliva, od kterých se snaží většina států odstupovat. Důvodem snižování spotřeby fosilních paliv je vysoká ekologická zátěž na životní prostředí a především jejich omezené zásoby.

1.1 Rozdělení biomasy

1.1.1 Rostlinná biomasa

Jak vyplývá z předešlého textu, rostlinná biomasa je tvořena těly rostlin. Rostliny jsou však příliš širokým spektrem druhů, které je třeba hlouběji rozdělit na dřevní biomasu a stébelniny.

- a) *Dřevní biomasa* - dřevní biomasou uvažujeme dřevnaté části dřevin a to převážně stromů. Je považována za palivo nízkoalkalické s nižším obsahem chlóru a vyšším obsahem síry [1]. Dřevní biomasa má nižší obsah prchavé hořlaviny než stébelniny [2]. V závislosti na stavu dřeva se výrazně liší vlhkost, kterou lze snížit vysoušením. K energetickým účelům jsou záměrně pěstovány např. topol a vrba [3], nicméně obecně lze využít prakticky jakékoliv dřevo získané např. při mýcení či péči o dřeviny. Dřevní biomasa je také získávána jako odpadní produkty dřevařského a zpracovatelského průmyslu např. ve formě pilin.

b) *Stébelniny* - stébelninami rozumíme rostliny bylinného charakteru, případně lze do této skupiny zahrnout i listí. Stébelniny jsou považovány za palivo vysokoalkalické s vyšším obsahem chlóru a nižším obsahem síry [1]. Tento druh biomasy má vysoký obsah prchavé hořlaviny [2]. Stébelniny k energetickým účelům jsou získávány především jako vedlejší produkt pěstování zemědělských plodin. Jedná se např. o obiloviny, obvykle ve formě volně ložené či balíkové slámy.

1.1.2 Živočišná biomasa

Živočišná biomasa, někdy také zoomasa, je využívána ve formě hnoje, kejdy, zbytků krmiv či odpadu z potravinářského průmyslu. Tato biomasa v ohřátém stavu vytváří bioplyn, který se využívá ke spalování. Bioplyn obsahuje od 50 % do 85 % metanu a také velké množství oxidu uhličitého a vodních par [3].

1.1.3 Odpadní biomasa

Do odpadní biomasy lze zahrnout jak rostlinnou tak živočišnou biomasu. Kromě již zmíněných odpadů lze využívat také komunální a průmyslový odpad, který je významnou částí tvořen právě biomasou. Např. lepenka, papír, textil a jiné.

1.2 Parametry dřevní biomasy

1.2.1 Energetické parametry

Z energetického hlediska se u biomasy zaznamenává několik parametrů, které definují její kvalitu. Tyto parametry jsou výhřevnost, spalné teplo, a poměrně důležitá je i entalpie spalin.

a) *Výhřevnost* - výhřevnost je množství energie v joulech uvolněné při úplném spálení jednoho kilogramu paliva, přičemž uvažujeme, že se spaliny ochladí na teplotu 20 °C a vodní pára na teplotu rosného bodu. Teplota kondenzace vody (rosný bod) závisí na mnoha faktorech, zejména na parciálních tlacích plynů v proudu spalin. Výhřevnost se určuje výpočtem ze spalného tepla.

b) *Spalné teplo* - spalné teplo je množství energie v joulech uvolněné při úplném spálení jednoho kilogramu paliva, přičemž uvažujeme, že se spaliny i vodní pára ochlazují na teplotu 20 °C. Jedná se o laboratorní hodnotu.

c) *Entalpie spalin* - Entalpií spalin rozumíme teplo, které si nesou spaliny. Množství tohoto tepla se pak využívá při výpočtu kotlů a tepelných výměníků. Pomocí entalpie spalin lze také hodnotit účinnost kotle [6].

1.2.2 Parametry určující užitečný obsah

Z hlediska složení je důležitých několik parametrů, které nám definují užitečnou část paliva. Jedná se o vlhkost, množství popelovin a hořlavinu.

a) *Vlhkost* - biomasa obsahuje různé množství vlhkosti, které lze ovlivnit vysoušením, bohužel však jen do jisté míry. Množství vlhkosti, kterou lze vyloučit ideálním vysoušením nazýváme hrubou vodou. Dále palivo obsahuje ještě zbytkovou vodu, která se uvolní až při spalování. Z hlediska spalování je voda nežádoucí součástí paliva, neboť má poměrně vysokou měrnou tepelnou kapacitu a než dojde ke vzplanutí paliva, je zapotřebí, aby se voda odpařila. Jinými slovy voda obsažená v palivu funguje jako chladicí médium a zpomaluje spalování.

b) *Množství popelovin* - popeloviny jsou částečně spalitelné anorganické složky obsažené v biomase [4]. Spalitelnou částí popelovin je tzv. prchavý podíl. Po spálení spalitelné části

zůstává tuhý zbytek tzv. popel, který se vytváří právě z popelovin [2]. Popel je složen ze škváry, která zůstává ve spalovacím prostoru, a z popílku, který je unášen proudem spalin. Negativním vlivem přítomnosti popelovin je odvádění tepla prostřednictvím popelu a snížení poměru užité části paliva. O dalších vlivech popelu se hovoří dále.

c) *Hořlavina* - Hořlavina je množství spalitelných látek obsažených v palivu. Zahrnuje jak část prchavou, tak část fixní. Prchavou hořlavinou rozumíme část hořlaviny, která se před vznícením mění na plynné skupenství, tedy vyprchává z paliva. Fixní hořlavinou rozumíme část hořlaviny, která v průběhu spalování zůstává v pevném skupenství až do proběhnutí chemické reakce. Při procesu spalování však dochází ještě ke spalování prchavého podílu, který spolu s hořlavinou tvoří tzv. zdánlivou hořlavinu [10].

1.2.3 Parametry určující výsledné nežádoucí produkty spalování

Výsledné produkty spalování jsou z velké části určeny chemickým složením paliva. Jedná se především o prvky N, S, F a Cl. Je možné zde zmínit i produkty uhlíku, nicméně chování uhlíku při spalování je řešeno později.

a) *Množství dusíku* - při spalování dochází k uvolňování dusíku z paliva a jeho následné oxidaci. Oxidací dusíku dochází ke vzniku jeho oxidů - oxidu dusnatého NO a oxidu dusičnatého NO₂, obecně označovaných jako NO_x. Převažující je obsah oxidu dusnatého, nicméně oxid dusičitý je několikanásobně více toxický [4]. Kromě toxicity těchto oxidů je velkým problémem i jejich velká reaktivita v atmosféře, kde se spolupodílejí na tvorbě kyselých dešťů vytvářením kyselin. Zároveň mohou vytvářet tzv. fotochemický smog, což je směs látek obsahujících ozon a tzv. fotooxidantů vzniklých reakcemi organických těkavých látek, nespálených uhlovodíků a některých dalších organických sloučenin s oxidy dusíku za přítomnosti slunečního záření [5]. Fotochemický smog mimo jiné vyvolává slzení, dýchací potíže, snížení imunity a chová se jako karcinogenní látka [5]. Fotochemický smog je někdy nazýván Losangeleským smogem [5].

b) *Množství síry* - tvorba oxidů síry probíhá analogicky jako u oxidů dusíku. Představiteli těchto oxidů jsou oxid siřičitý SO₂ a oxid sírový SO₃. Podobně jako oxidy dusíku vytvářejí oxidy síry kyselé deště. Dalším úskalím tvorby těchto oxidů je rovněž poměrně dlouhá doba jejich setrvání v atmosféře.

c) *Množství chlóru* - na rozdíl od dusíku a síry tento prvek netvoří oxid, nýbrž přímo kyselinu chlorovodíkovou HCl. Tato kyselina se rovněž může podílet na tvorbě kyselých dešťů a zároveň se výrazně podílí na korozi energetických zařízení.

Legislativa stanovuje emisní limity vycházející z "BAT - Best Available Techniques" (nejlepší dostupná technologie) [14]. Z důvodu dodržování těchto limitů musí být spalovny vybaveny blokem čištění spalin, který obvykle tvoří tyto technologie: [15]

a) *Technologie selektivní katalytické a nekatalytické filtrace (SCR a SNCR)* - odstraňování NO_x. [15]

b) *Technologie pro odstraňování dioxinů* - katalytická filtrace REMEDIA D/FTM, 4D SYSTÉM (keramické trubice), kombinované odstraňování dioxinů a NO_x (DeNO_x, DeDiO_x), adsorbční čištění pomocí aktivního uhlí či metodou ADIOX®. [15]

c) *Chemické čištění spalin* - suchá, polosuchá či mokrá vypírka. Odstraňování SO₂ a dále HCl, HF a těžkých kovů. [15]

1.3 Způsoby energetické přeměny

Existuje několik způsobů, jak lze z biomasy získávat tepelnou energii, přičemž u jednotlivých způsobů dochází k jiným pochodům a to při odlišných podmínkách. V této kapitole jsou zohledněny.

1.3.1 Spalování

Spalování biomasy je základním a nejjednodušším způsobem energetické přeměny biomasy. Ačkoliv jde principiálně o stejný pochod jak v otevřeném, tak v uzavřeném ohništi, chování tohoto procesu je výrazně odlišné. V současné době se lze se spalováním v otevřeném ohništi setkat již jen zřídka v podobě táboráků a spaluje se v uzavřeném ohništi, které dosahuje výrazně vyšší účinnosti [2].

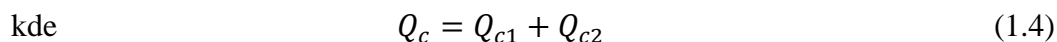
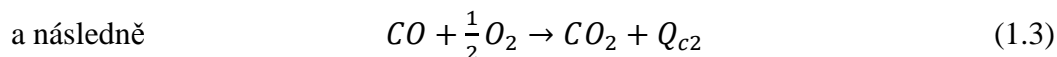
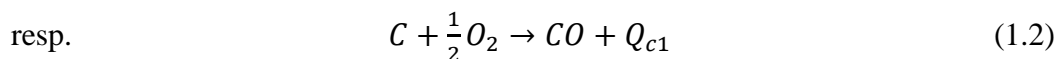
Pro vysvětlení spalovacího procesu je vhodné definovat pracovní látky, kterými jsou:

- a) *Palivo* - hořlavá látka s dostatečnou výhřevností a aktivitou okysličovacích pochodů [6].
- b) *Okysličovadlo* - látka obsahující kyslík, nejčastěji vzduch [6].
- c) *Produkty spalování* - produkty spalovacího pochodu, které vznikají jako výsledek chemických reakcí mezi palivem a okysličovadlem. Jedná se o spaliny a zároveň o tuhý či kapalný zbytek [6].

Spalování resp. hoření má charakter řetězového děje, při kterém dochází k okysličování paliva exotermickou reakcí za vzniku produktů spalování [6]. Při hoření paliva s okysličovadlem se vždy část uvolněného tepla spotřebuje k iniciaci hoření další části této směsi [6]. Hoření trvá až do okamžiku vyčerpání hořlavé směsi, vyčerpání okysličovadla, případně do okamžiku, kdy intenzivním odvodem tepla přerušíme řetězovou reakci¹ [6].

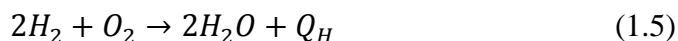
Převažující část procesu spalování, kdy se neuvažují příměsi, lze popsat rovnicemi spalování:

- a) *spalování uhlíku na oxid uhličitý* CO_2 [6]



Z těchto rovnic vyplývá, že pro úplné spálení 1 kg uhlíku je zapotřebí 2,667 kg kyslíku, přičemž se uvolní 3,667 kg CO_2 a 33,8 MJ tepla.

- b) *spalování vodíku na vodní páru* H_2O [6]



Z této rovnice vyplývá, že pro úplné spálení 1 kg vodíku je zapotřebí 7,937 kg kyslíku, přičemž se uvolní 8,936 kg vodní páry a 119,6 MJ tepla.

¹ v uplynulých několika letech se řeší vliv zvukových vln o nízkých frekvencích na stabilitu hoření. Tyto zvukové vlny pravděpodobně narušují hranice oblasti hoření a ochlazují plamen intenzivním kontaktem s okolím.

c) *spalování síry na oxid siřičitý* SO_2 [6]



Z této rovnice vyplývá, že pro úplné spálení 1 kg síry je zapotřebí 0,998 kg kyslíku, přičemž se uvolní 1,998 kg oxidu siřičitého a 9,25 MJ tepla.

d) *spalování dusíku na NO_x* - dochází buď k termické oxidaci dusíku při teplotách přesahujících 1400 °C, kterých se při spalování biomasy nedosahuje, případně při rychlých reakcích s volnými radikály na HCN následně na NH_3 a dále na NO_x [4]. Ačkoliv je množství dusíku v biomase větší než množství síry [7], nesplněním podmínky termické oxidace dusíku je jeho tvorba značně zredukována.

Jak je zřejmé z rovnic spalování, pro spálení určitého množství paliva je zapotřebí dané množství kyslíku. Celkové množství kyslíku pak lze určit jako součet parciálních potřeb kyslíku na jednotku paliva na základě koncentrací jednotlivých prvků [6]. Toto množství kyslíku je sníženo o obsah kyslíku v palivu [7]. Na základě znalosti složení atmosférického vzduchu lze určit množství vzduchu nezbytného ke spalování, přičemž je zapotřebí zohlednit i obsah vodní páry, který se různí [7].

V praxi není možné dodávat přesné množství vzduchu a zároveň docílit jeho dokonalého promísení s palivem. Proto rozlišujeme dvě podskupiny spalování:

a) *nedokonalé spalování* - při nedokonalém spalování dochází k nedostatečnému promísení paliva s oksyličovadlem nebo je oksyličovadla nedostatek [7]. Prakticky se nedokonalé spalování projevuje tvorbou CO , H_2 a C_xH_y . Např. při spalování uhlíku na CO dochází k poloviční spotřebě kyslíku a uvolnění pouze jedné třetiny možné energie [7]. Z těchto důvodů je snahou předcházet nedokonalému spalování vhodnou volbou přebytku vzduchu [7].

b) *spalování za přebytku vzduchu* - pro dosažení dokonalého spalování volíme vhodný přebytek vzduchu, který se volí na základě obtížnosti mísení paliva s oksyličovadlem a spalování paliva, např. vlivem velkého obsahu popelovin [7].

Spalování paliva se dále popisuje z hlediska chování paliva z důvodu odlišného chování prchavé a pevné hořlaviny.

I. *prchavá hořlavina* - Jak již bylo uvedeno - při spalování dochází k ohřevu a následnému uvolňování prchavé hořlaviny na plynnou fázi. Tato část paliva se mísí se sekundárním, případně terciárním vzduchem (kap. 2.3) a dochází k jejímu spalování. Má tendenci unikát z prostoru ohniště a je tedy zapotřebí rychlého spálení, popřípadě dostatečně dlouhého prostoru pro spálení [2].

II. *pevná hořlavina* - Pevná hořlavina je hořlavým zbytkem paliva. K jejímu spalování dochází mísením s primárním vzduchem, přičemž je poměrně problematické zajistit dostatečný a rovnoměrný přísun kyslíku [2].

Průběh spalování se dále rozděluje na jednotlivé fáze:

1. - ohřev částice
2. - odpaření vlhkosti z paliva
3. - uvolnění prchavé hořlaviny
4. - hoření prchavé hořlaviny
5. - hoření fixního uhlíku

6. - ochlazení popele [16]

1.3.2 Zplyňování

Zplyňování je endotermický proces, při kterém je cílem získat plyn vhodný přímo ke spalování [8]. Tímto plynem je CH_4 , CO a H_2 , případně syntézní plyn CO a H_2 v žádaném poměru [8]. Zplyňováním se potlačuje vznik koksu a minimalizuje se podíl dehtů. Teplo, které je zapotřebí do reaktoru dodat, je přiváděno zvenčí, případně je možné část biomasy k získání tepla spálit [8].

Prvním krokem při zplyňování je pyrolýza makromolekul na prchavé složky, následně štěpení v plynné fázi a reakce s vodní párou, která se uvolňuje z biomasy, případně se do reaktoru přidává spolu se vzduchem [8]. Podíl pyrolýzy na procesu zplyňování se zvyšuje s klesajícím množstvím okysličovadla. Koks, který obvykle při pyrolýze vzniká, se částečně spaluje s přítomným kyslíkem a částečně reaguje s vodní párou a CO_2 .

1.3.3 Pyrolýza

Pyrolýza je rovněž reakcí endotermickou. Jedná se o proces probíhající v inertní atmosféře, při kterém se vlivem tepla štěpí vazby v organických molekulách a vznikají menší molekuly [8]. Tyto reakce lze rozdělovat:

a) *primární* - dochází ke štěpení vazeb C-C, C-H, C-O v organických sloučeninách za vzniku nízkomolekulových produktů, které spolu mohou reagovat [8].

b) *kondenzační, alkylace, cyklizace, vznik aromatů až koksu* [8]

Produkty pyrolýzy biomasy jsou vždy pyrolyzní plyn, dehty a pyrolyzní koks [8]. Pyrolyzní plyn je složený z metanu, vodíku, oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého a vodní páry, přičemž toto složení je závislé na složení, původu biomasy, vlhkosti, velikosti částic, inertním plynu, teploty v pyrolyzním reaktoru, času, po který je pyrolyzní plyn v reaktoru, rychlosti ochlazení odcházejícího pyrolyzního plynu a na typu katalyzátoru [8].

Obecně lze říci, že nižší teploty (400 - 500 °C) a delší strávená doba plynu v reaktoru zapříčiňuje vyšší podíl koksu, střední teploty (500 - 600 °C) a krátká strávená doba plynu v reaktoru vede na vysoký podíl dehtů a vysoké teploty (800 - 1000 °C) a dlouhá strávená doba plynu v reaktoru vede na vysoký podíl pyrolyzního plynu [8].

Pyrolyzní plyn je vhodným palivem pro spalování v plynových turbínách [8].

1.4 Popel

Jedním z produktů spalovacího procesu je popel, který se vytváří z popelovin obsažených v palivu. Tato kapitola pojednává o jeho vlastnostech a důsledcích jeho přítomnosti.

1.4.1 Charakteristika popelu

Popel ze spalování biomasy je bohatý na obsah alkalických kovů a kovů alkalických zemin. Dále obsahuje velké množství křemíku, větší množství železa, případně hliníku. Nezanedbatelný podíl na celkovém obsahu prvků má též síra a fosfor. Reakce popela je zásaditá [11].

Popelovina při spalování přechází v tuhý zbytek po spalování, z něž část zůstává a zbývající část odlétá jako popílek unášený spalinami [9]. V případě roštových kotlů se do tuhého zbytku započítává i propad, což je směs drobných částic popelu a malých částí nevyhořelého paliva, která propadává mezerami mezi roštnicemi [9].

1.4.2 Termoplastické vlastnosti popelu

Termoplastické vlastnosti popelu vyjadřují chování popelovin při vysokých teplotách v ohništi, především pak průběh měknutí, tavení a tečení částice popela [9]. Rozhodujícím vlivem je poměr kyselých a zásaditých oxidů, pro jehož číselné vyjádření se užívají různá kritéria pro hodnocení náchylnosti popelu ke struskování [9].

- a) *teplota deformace* - v důsledku tání nastávají první příznaky zaoblení hrotu nebo okrajů zkušebního tělesa způsobené táním [12].
- b) *teplota měknutí* - projevuje se tím, že okraje zkušebního tělesa tvaru krychle nebo válce jsou již zcela zaobleny, ale nedochází ke změně výšky vzorku [12].
- c) *teplota tání* - při této teplotě vznikne ze zkušebního tělesa přibližně polokoule, kde její výška je třetina výšky zkušebního tělesa při teplotě tání [12].
- d) *teplota tečení* - popel se na podložce zcela rozteče ve vrstvě o výšce třetiny zkušebního tělesa při teplotě tání [12].

1.4.3 Důsledky přítomnosti popelu

Přítomnost popelu je spojena s velkým množstvím nežádoucích jevů. Několik nejdůležitějších je zde uvedeno:

- a) *snižování účinnosti kotle* [9]
- b) *mechanický otěr teplosměnných částí* [9]
- c) *tvorba popílkových nánosů* [9]
- d) *tvorba struskových nánosů* [9]
- e) *korozie teplosměnných ploch na straně spalin* [9]

1.5 Spaliny

Dalším z produktů spalování jsou unikající spaliny. V této kapitole jsou shrnuty vlastnosti a důsledky spojené s jejich tvorbou a následným chováním.

1.5.1 Vlastnosti spalin

a) *objem spalin* - spotřeba vzduchu a objem spalin se nejčastěji určují ze stechiometrických spalovacích rovnic hořlavých složek paliva při jeho známém složení. Další možností je orientační výpočet pomocí empirických vztahů z výhřevnosti paliva. Při výpočtech objemů plynů se vychází z molekulových hmotností jednotlivých prvků hořlaviny. Molekulovou hmotnost vyjadřujeme v molech. Jeden mol udává hmotnost látky v gramech, odpovídající jeho molekulové hmotnosti. Podle Avogadrova zákona je ve stejném objemu ideálního plynu při stejném tlaku a teplotě stejný počet molekul. Standardně jsou všechny objemy uváděny za normálních fyzikálních podmínek² - metr normální krychlový [6]. Objem spalin je důležitým parametrem pro dimenzování spalinovodů, čištění spalin apod.

b) *entalpie spalin*

c) *chemické složení spalin*

d) *obsah chemického nedopalu* - obsah chemického nedopalu má přímý důsledek na tepelné ztráty. Odvádí teplo a zároveň se neuvolní jeho energie. Rovněž ovlivňuje mechanické opotřebování a tvorbu nánosů na teplosměnných plochách a spalinovodech.

² Normálními podmínkami se uvažuje atmosférický tlak 101 325 Pa a termodynamická teplota 273,15 K

1.5.2 Důsledky tvorby spalin

a) *tepelné ztráty* - ztráta fyzickým teplem spalin³ je dána tepelnou energií odcházejících plynných spalin. Bývá největší ztrátou kotle. Má na ni rozhodující vliv teplota spalin za kotlem a součinitel přebytku vzduchu za kotlem (souvisí s těsností kotle a přísáváním falešného vzduchu). Komínová ztráta se dá ovlivnit snížením teploty spalin za kotlem a minimalizací součinitele přebytku vzduchu. Oba zásahy lze však dělat pouze do určité míry. Teplota spalin nesmí být nižší, než je rosný bod spalin. Při nižší teplotě dochází ke zkapalnění vodní páry, což je doprovázeno tzv. nízkoteplotní korozí ze strany spalin, které negativně působí na kovové výhřevné plochy i na vyzdívky a jsou zdrojem provozních potíží. Při minimalizaci součinitele přebytku vzduchu dochází ke zvýšení míry nedokonalosti spalování a tím i zvyšování ztráty chemickým nedopalem [6].

b) *životní prostředí* - součástí spalin jsou oxidy dusíku a síry. Dále kyseliny např. chloru a fosforu, které se mohou stát příčinou kyselých dešťů. Proto je třeba tyto oxidy eliminovat nebo alespoň omezovat.

c) *úlet* - proud spalin je hnacím médiem pro úlet mechanického nedopalu a popílku. Docházeli ke zvýšenému úletu, je třeba na spalinovod napojit odlučovač popílku k zachytávání těchto částic.

d) *koróze* - chemické složení spalin také zapříčiňuje zvýšenou míru koróze, která je navíc podporována zvýšenou teplotou, přítomností vodní páry a otěrem tuhých částic obsažených ve spalinách.

³ ztráta fyzickým teplem spalin se běžně označuje pojmem komínová ztráta.

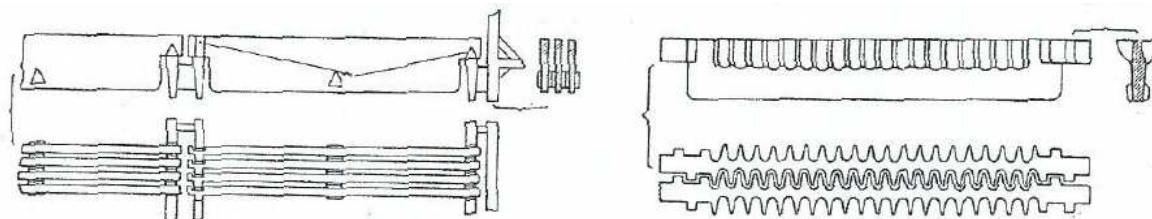
2 SPALOVÁNÍ V ROŠTOVÉM OHNIŠTI

Na základě předchozích poznatků je zřejmé, že na kvalitu spalovacího procesu má výrazný vliv proudění vzduchu ve spalovací komoře. V této kapitole je definována konstrukce roštu vhodná ke spalování biomasy, která je posledním faktem nutným k popisu a pochopení problematiky proudění.

2.1. Konstrukce kotle pro přímé spalování

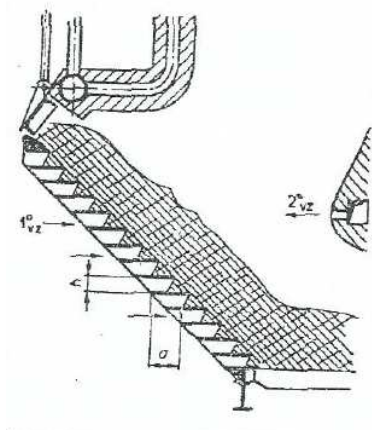
Existuje mnoho konstrukcí roštů pro přímé spalování, nicméně pro potřeby této práce je nejdůležitější rošt pevný rovinný a stupňovitý. Pro představu jsou uvedeny i některé další.

a) *kotle s pevným rovinným roštem* - rošt pro tento typ kotle se sestavuje ze štíhlých desek ve tvaru nosníků s nálitky takovým způsobem, aby mezi deskami vznikaly mezery pro přívod primárního vzduchu [9]. Tyto mezery musí být dostatečně úzké, aby nedocházelo k propadávání paliva roštem, a zároveň je vhodné, aby jejich plocha byla co největší a proudící primární vzduch mohl rošt ochlazovat [9]. Pro zlepšení odvodu tepla je možná použít zvlněné roštnice viz Obr. 1 vpravo, případně duté, které umožňují ochlazovat rošt prouděním vody [9].



Obr. 1 - konstrukce pevného roštu a roštu se zvlněnými roštnicemi [9]

b) *kotle s pevným stupňovitým roštem* - Kotle se stupňovitým roštem jsou výhodné pro spalování paliv, která lze spalovat v silnější vrstvě a paliva s velkým obsahem prchavé hořlaviny, což je případ biomasy [9]. Rošt se skládá ze dvou částí. Ze vstupní šikmé části, kterou tvoří stupňovitý rošt a z výstupní vodorovné části, kterou tvoří rovinný rošt [9]. Stupňovitý rošt je vyroben z litinových roštnic ve tvaru stupňů, jejichž výška a přesah se volí tak, aby nedocházelo k propadu paliva [9]. Palivo se po stupňovitém roštu vlivem gravitace a tíhy čerstvého paliva sesouvá dolů [9]. Postupně vyhořívá především prchavá hořlavina a pevná část hořlaviny dohořívá až dole na rovinném roštu [9].



Obr. 2 - konstrukce stupňovitého roštu [9]

- c) *kotle s mechanickým roštem pásovým*
- d) *kotle s mechanickým roštem přesuvným*
- e) *kotle s mechanickým roštem vrativým*

2.2 Primární vzduch

2.2.1 Charakteristika primárního vzduchu

Primární vzduch je část spalovacího vzduchu, která je přiváděna do prostoru pod roštem [9]. Proudění primárního vzduchu musí být podpořeno ventilátorem, aby byl zajištěn dostatečný přísun spalovacího vzduchu a bylo dosaženo požadovaného přebytku spalovacího vzduchu. Z prostoru pod roštem proniká mezerami v roštu do paliva a mísí se s ním. Tímto způsobem se zajišťuje přísun spalovacího vzduchu do centra spalování a zajišťuje se tak dokonalé spalování paliva [2]. Jelikož spalování probíhá v několika fázích, je požadované množství spalovacího vzduchu rozdílné a přivádí se v různém množství do několika pásem [9]. Nastavení přísunu spalovacího vzduchu je možné řídit natáčením klapky a to jak manuálně, tak automaticky.

2.2.2 Vliv primárního vzduchu na spalovací proces

Důsledkem splněných podmínek dokonalého hoření je nárůst účinnosti na 60 - 65 %, což je přibližně 5x více než u otevřeného ohniště [2]. Vháněný primární vzduch o běžné teplotě však ochlazuje plamen a zpomaluje spalovací proces [2]. Z tohoto důvodu se primární vzduch přehřívá. Zbývající teplotní rozdíl pomáhá dorovnat dohořívání tuhého zbytku. Množství primárního vzduchu bývá obvykle do 40 % celkového množství spalovacího vzduchu, což je umožněno poměrně vysokým obsahem kyslíku v palivu [10]. Zbývajících 60 % tvoří sekundární resp. terciární vzduch (kap. 2.3).

Jak již bylo zmíněno, pro jednotlivé fáze hoření je zapotřebí různé množství spalovacího vzduchu. Regulace potřebného v čase nerovnoměrného množství spalovacího vzduchu při hoření je však velmi náročná [2]. Zbytečně velký přebytek vzduchu ochlazuje plamen, čímž zpomaluje, až zastavuje rychlost hoření [2]. Při nedostatku spalovacího vzduchu nemůže dojít k dokonalému spalování uvolněné prchavé hořlaviny [2]. Možností jak spalovací proces zrovnomenit a částečně tak eliminovat problémy spojené s regulací spalovacího vzduchu, je kontinuální přivádění dřeva v granulovaném stavu např. jako štěpku či pelety [2].

2.2.3 Negativní vlivy spojené s prouděním primárního vzduchu

- a) *nízká rychlost proudění* - nízká rychlost proudění vede ke snížení schopnosti pronikat do prostoru spalování⁴, a je tak snížena míra mísení paliva s oksličovadlem.
- b) *nevhodná konstrukce roštu* - je důležité, aby mezery byly dostatečně velké a umožňovaly tak snadné proudění primárního vzduchu skrz vrstvu paliva, přičemž nesmí docházet k propadávání paliva [9]. Taktéž nemá docházet k ucpávání mezer popelem či struskou [9].
- c) *přisávání falešného vzduchu* - falešným vzduchem je myšlen nežádoucí vzduch, který je přisáván do spalovací komory⁵. Falešný vzduch vede ke snížení teploty spalovacího vzduchu, a tím k ochlazování plamene a zpomalování hoření [2].

⁴ snížená schopnost pronikání je zapříčiněna malou hybností částic a nárůstem viskozity plynu při teplotách spalování.

⁵ vlivem narůstání teploty dochází přibližně k trojnásobné změně objemu plynu uvnitř spalovací komory a vytvoření mírného podtlaku, který způsobuje přisávání netěsnostmi.

2.3 Sekundární vzduch

2.3.1 Charakteristika sekundárního vzduchu

Při hoření prchavé hořlaviny je nezbytné zajištění dostatku kyslíku, neboť kyslík z paliva a primárního vzduchu je spotřebováván při zapalování. Proto se přivádí do oblasti nad roštem sekundární vzduch, v některých případech i nadvakrát, pak se hovoří o vzduchu terciárním. [4]. Sekundární vzduch je přiváděn buď samovolným přísáváním způsobeným vztlakem teplých spalin či nuceným prouděním tryskami.

2.3.2 Vliv sekundárního vzduchu na spalovací proces

Jak již bylo řečeno, přiváděním sekundárního vzduchu se doplňuje chybějící spalovací vzduch pro dokončení spalování prchavé hořlaviny [2]. Mírným nadbytkem spalovacího vzduchu se sníží obsah nebezpečných zplodin a také množství produkovaného popílku. Rovněž dokonalejším spalováním dojde ke zkrácení plamene [2].

Zkrácení plamene je důležité především při spalování stébelnin, pro které je typické šlehání dlouhého plamene. Toto šlehání je nebezpečné, vyžaduje delší spalinovod, zvyšuje rychlost proudění spalin a tím způsobuje větší tepelnou ztrátu [6].

Významnou roli při spalovacím procesu stejně jako u primárního vzduchu hraje teplota přiváděného vzduchu. Ze stejných důvodů je vhodné předehtřívat přiváděný vzduch. K předehtřevu vzduchu se používají spaliny, které mají vysokou teplotu. Tímto způsobem se zároveň sníží teplota odváděných spalin a tím i tepelné ztráty [6].

Důležité je vhodné umístění přívodů sekundárního vzduchu tak, aby měl možnost se mísit s hořlavinou v co největším objemu ohniště, a pokud je to možné, je zapotřebí volit co nejvyšší rychlost v přívodu vzduchu. Zvýšená rychlost zlepšuje promísení vzduchu s palivem. Přivádí-li se vzduch tryskami ze samostatného zdroje, je přijatelná úst'ová rychlost cca $50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Poslední fází hoření je vyhořívání fixního uhlíku. Pokud heterogenní reakce probíhá při dostatečně vysokých teplotách, je její rychlost závislá na rychlosti přívodu kyslíku, který je okamžitě využíván ke spalování [4].

Výrazný vliv na spalování má rovněž charakter proudění vzduchu. Na rozdíl od laminárního proudění dochází při proudění turbulentním k urychlení chemické reakce vlivem působení turbulentní difúze a turbulentního vedení tepla, které jsou řádově vyšší než odpovídající molekulární děje. Zároveň vznikem pulsací na hranici plamene dochází k podstatnému zvětšení povrchu plamene, a tím ke zvětšení množství proreagované směsi [16].

2.3.3 Negativní vlivy spojené s prouděním sekundárního vzduchu

a) *falešný vzduch* - k přísávání dochází skrz netěsnosti v konstrukci kotle, případně spalinovodu. Důsledkem přísávání falešného vzduchu je zvýšení přebytku spalovacího vzduchu, čímž dochází k nadměrnému ochlazování plamene a rychlejšímu odvodu spalin vztlakem. Zároveň dochází ke zvětšování objemu spalin, a tím i příkonu spalinových ventilátorů [7].

b) *příliš vysoká teplota plamene* - jedním z požadavků pro dokonalé vyhoření prchavé hořlaviny je dostatek času a dostatečně velký objem ohniště, přičemž hraje roli také poměr výšky ohniště k jeho průměru, resp. délka oblasti hoření plamene. Čím větší je výška ohniště, tím lépe lze zajistit dokonalé vyhoření prchavé hořlaviny. Promísení uvolněné prchavé hořlaviny se spalovacím vzduchem je obtížné. U plynů dochází k nárůstu viskozity s teplotou, a při vysokých teplotách v ohništi je mísení dvou vazkých plynů problémové. Může docházet

k případům, kdy velká část spalovacího vzduchu prochází ohništěm (obvykle podél stěny), aniž by se zúčastnila spalování, a hořlavé plyny vyhořívají nedokonale [4].

c) *nízká rychlost proudění* - stejně jako v případě primárního vzduchu je zapotřebí dosahovat dostatečné rychlosti proudění. Závažnost tohoto problému narůstá s teplotou plamene, jak je zmíněno výše. Dosažení vhodné rychlosti proudění sekundárního vzduchu se řeší použitím ventilátor, případně trysek. Rovněž je vhodné dosáhnout turbulentního proudění vzduchu.

3 TECHNICKÉ PARAMETRY ŘEŠENÉHO ZAŘÍZENÍ

3.1 Popis zařízení

Zplyňovací komora má hmotnost 600 kg a má jmenovitý výkon 110 kW. Jako palivo je možné užívat dřevní štěpku, piliny či pelety o maximální zrnitosti 30 mm.

Hlavní rozměry spalovací komory jsou výška 700 mm, šířka 386 mm a hloubka 500 mm.

Rošt je tvořen šikmým perforovaným plechem s dírami o průměru 4 mm a rovinným plechem s dírami o průměru 4 mm. Rošt je tvořen symetricky uloženou dvojicí rovinné a šikmé části roštu, které jsou pro zjednodušení výpočtu spojeny do jednoho kusu, přičemž byly zanedbány nosné prvky roštu⁶. Z obou stran roštu, tj. u stěny, i mezi jeho částmi je vůle.

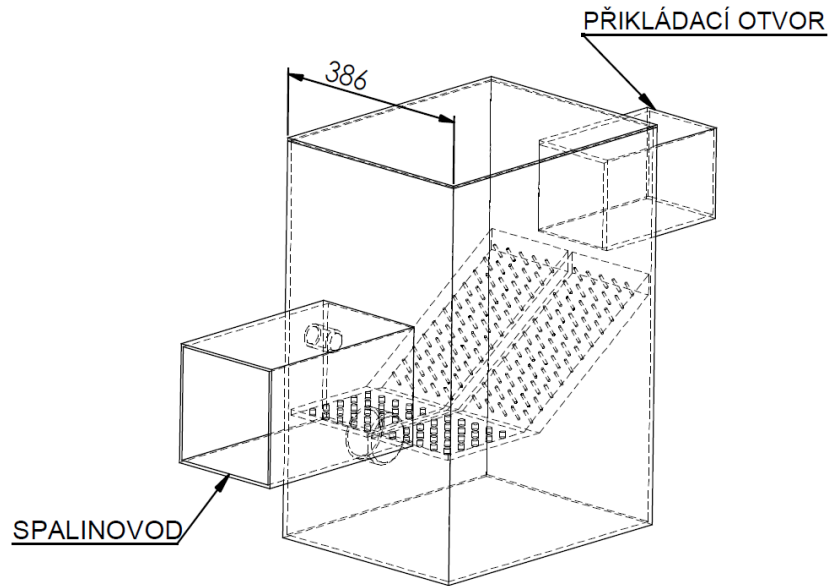
Nad šikmou částí roštu je umístěn příkládací otvor o rozměrech 150×150 mm. Nad částí rovinnou je umístěn výstup pro spalinovod o rozměrech 200×200 mm.

Přívod primárního vzduchu je umístěn v prostoru pod roštem a je tvořen trubkou o průměru 80 mm. Přívod sekundárního vzduchu je umístěn nad rovinnou částí roštu a je tvořen trubkou o průměru 30 mm.

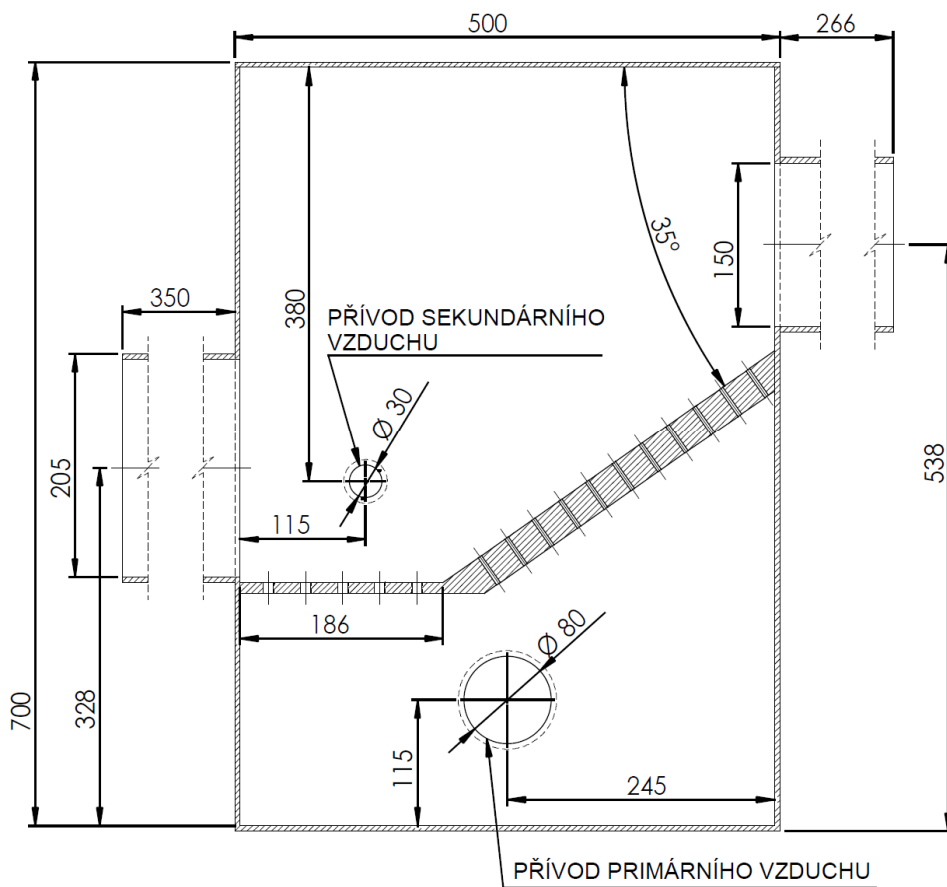
Skutečné provedení je opatřeno ještě kontrolním otvorem umístěným na čelu spalovací komory (pohled řezu). Stěny spalovací komory jsou tvořeny šamotovou vyzdívkou.

⁶ nosné prvky roštu lze zanedbat, neboť se nacházejí v části spalovací komory, kde příliš neovlivňují proudění spalovacího vzduchu. Jejich zanedbáním se výpočtový model výrazně zjednoduší, čímž klesne výpočetní čas.

3.2 Schématický náčrt zařízení



Obr. 3 - izometrické zobrazení spalovací komory

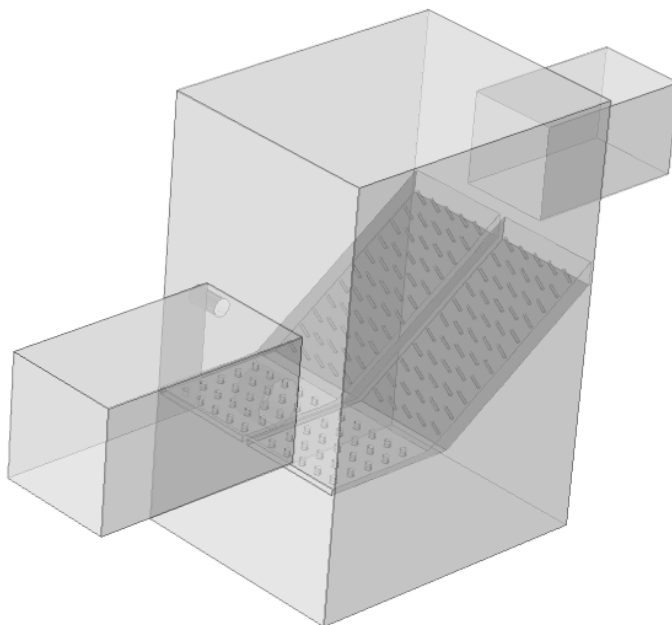


Obr. 4 - řez spalovací komorou

4 ANALÝZA PROUDĚNÍ STUDENÉHO VZDUCHU POMOCÍ CFD

4.1 Tvorba geometrie

Reálný prostor spalovací komory zahrnuje řadu geometrických prvků, které nemají na průběh proudění příliš významný vliv, a současně citelně prodlužují čas nutný k simulaci. Z těchto důvodů je výsledný simulační model zjednodušen. Části roštu jsou spojeny a tvořeny pouze silným plechem, mezery v roštu se nerozšiřují spolu s narůstající tloušťkou, a také je odstraněna nosná trubka.



Obr. 5 - simulační model spalovací komory

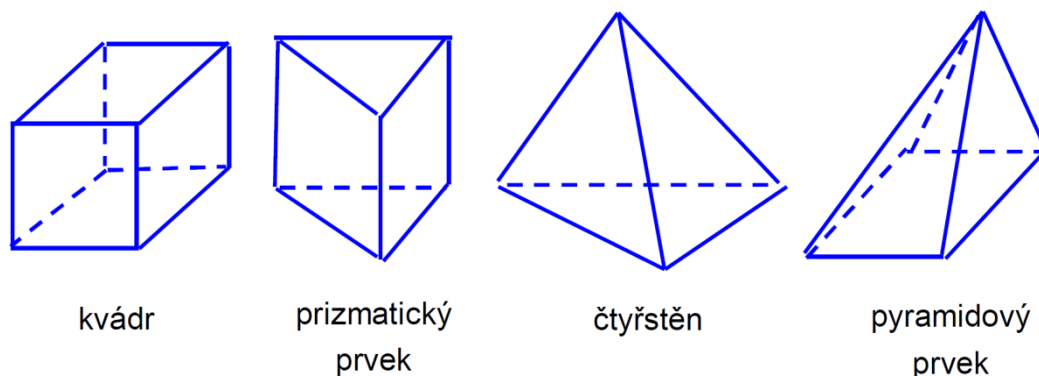
4.2 Tvorba výpočtové sítě

Zdrojem výpočtové sítě je prostor vymezený geometrií simulačního modelu spalovací komory. Tato geometrie slouží k určení hranic řešeného prostoru, vytvoření překážek, vstupů a výstupů. Tento prostor, o kterém se obvykle hovoří jako o výpočtové oblasti, je dále rozdělen na konečný počet dílčích 3D prvků⁷.

Způsob rozdělení na jednotlivé prvky významně ovlivňuje výsledný výpočetní čas. Je nezbytné minimalizovat počet buněk na nezbytné minimum, které však stále podává relevantní informace a také nesnižuje kvalitu sítě. Kvalitou sítě se rozumí pokud možno rovnoměrné rozdělení prvků přibližně stejné velikosti a co nejméně deformovaných. Toto pravidlo lze však obecně jen stěží dodržet, a síť se zhušťuje v oblastech, které jsou významné pro analýzu, a zředňuje v oblastech nepříliš významných. Vždy se však dbá na plynulost změn hustoty sítě, protože prudké změny hustoty mají negativní vliv na konvergenci výpočtu. Míra deformace prvků se posuzuje na základě nesouměrnosti, poměru hran či ploch apod. [17]

⁷ odtud název metody MKP - Metoda konečných prvků, v anglické literatuře FEM - Finite element method.

K vytvoření sítě se využívá kombinace prvků ve tvaru kvádrů, prizmy, čtyřstěnu či pyramidy, viz Obr. 1 Obr. 6



Obr. 6 - tvary prvků výpočtové sítě [17]

Při vytváření výpočtové sítě se jako problémové jeví oblasti perforace roštu, průduchy mezi stěnami a roštem, průduch mezi rošty, přechod mezi roštem a příkládacím otvorem, a přechod mezi roštem a výstupním otvorem pro spalínovod.

Jako první pokus o vytvoření sítě bylo využito defaultního nastavení programu. Výsledkem byla náročná síť o několika milionech prvcích, kde se průměrná kvalita sítě blížila hodnotě 0,5 a minimální v řádech miliontin. Při pokusech o zjemnění sítě se prudce navyšoval počet prvků až do řádu desítek milionů, přičemž kvalita sítě se příliš neměnila.

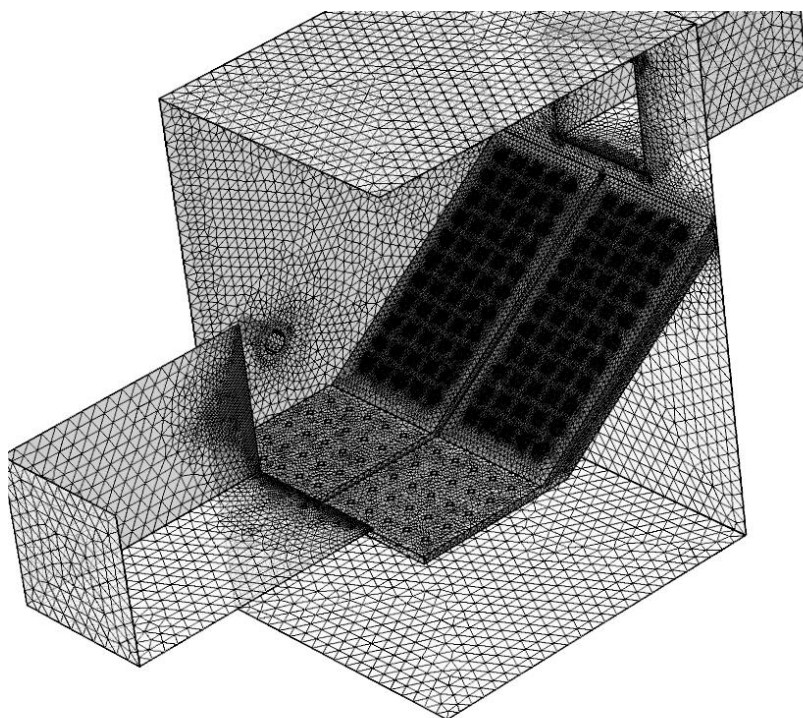
Jako dostačující minimální kvalita sítě pro úspěšnou konvergenci řešení je obecně považována hodnota 0,01⁸. Pro dosažení vyšší kvality sítě se využilo ručního nastavení tvorby sítě.

Použití kvádrů se ukázalo jako dostatečně kvalitní pouze v případě perforací v rovinném plechu, které musely být následně rozděleny na pravidelné čtyřstěny. Ostatní hraniční plochy výpočtové oblasti se rozdělily pomocí trojúhelníků o různém nastavení minimálních a maximálních rozměrů, dle tvarové složitosti. Hrany v přechodech mezi roštem a příkládacím otvorem, a mezi roštem a výstupním otvorem pro spalínovod, se zjemnily. Zbylý objem se vyplnil čtyřhrany. Výsledná průměrná hodnota kvality sítě je 0,76 a minimální hodnota sítě 0,021 při počtu prvků 2.021.170 a cca 1.452.000 DOF⁹.

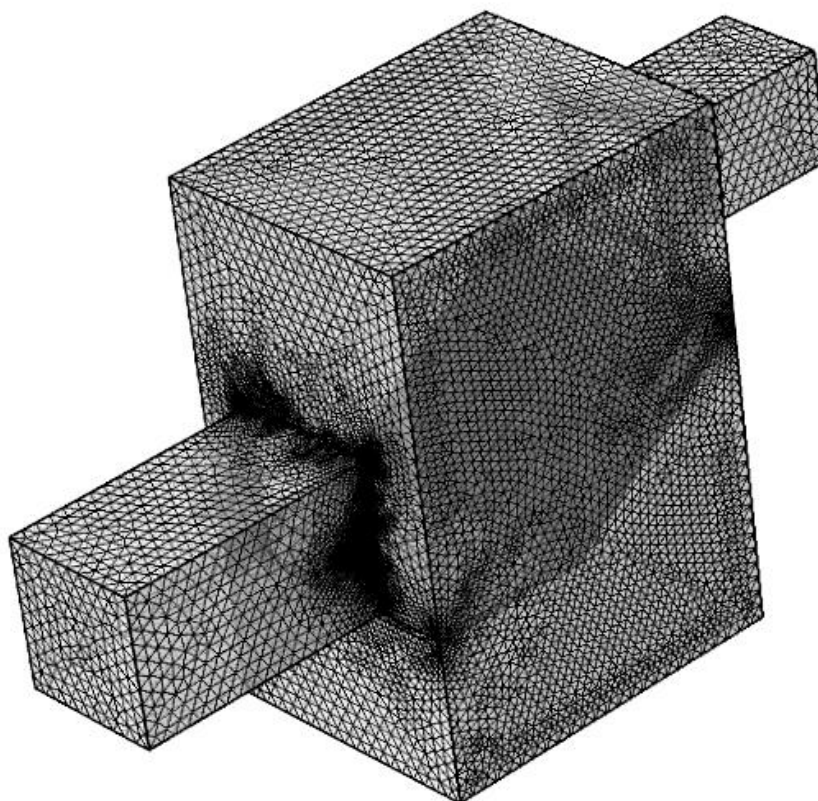
Jak lze rozpoznat z obrázků níže, hustota sítě v oblasti šikmého roštu potvrzuje původní předpoklad o hustotě sítě v kritických místech. Výsledná síť z důvodu své složitosti vyžaduje poměrně vysoký výpočetní výkon, kterého již běžné počítače do 16 GB RAM nedosahují.

⁸ tato minimální hodnota je zmiňována na oficiálním fóru programu COMSOL.

⁹ DOF - Degrees of freedom - stupně volnosti.

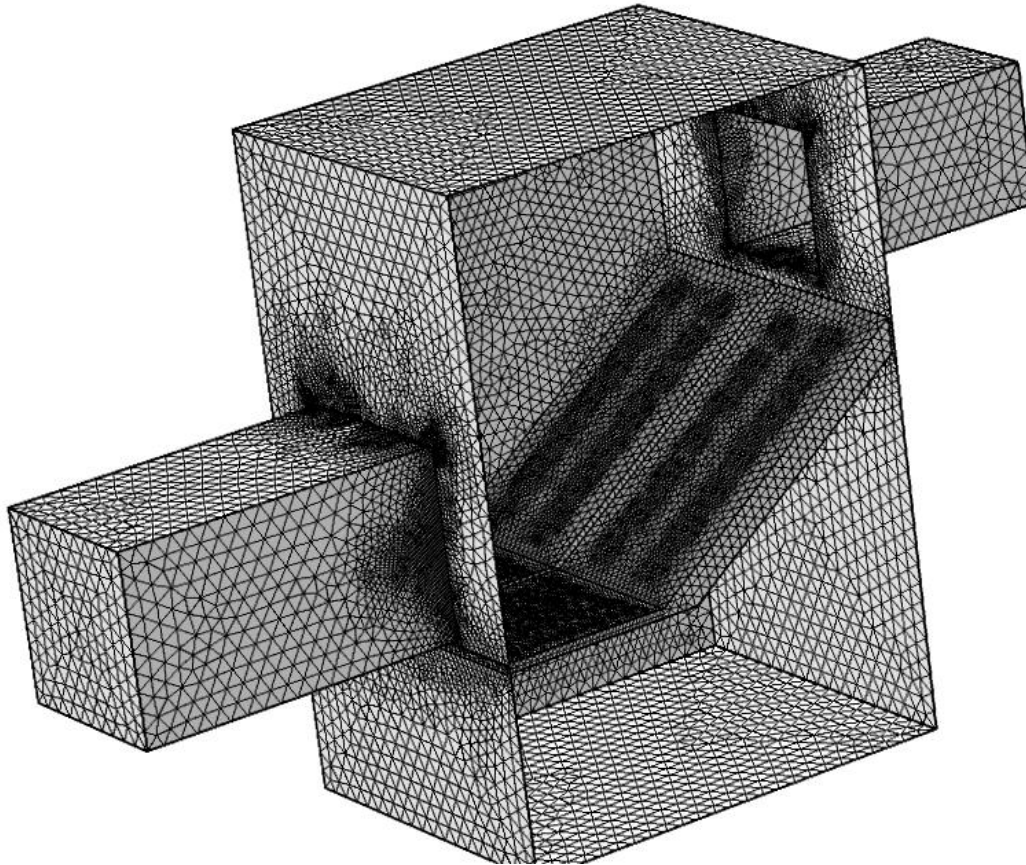


Obr. 7 - vnitřní hranice sítě výpočetní oblasti



Obr. 8 - vnější hranice sítě výpočetní oblasti

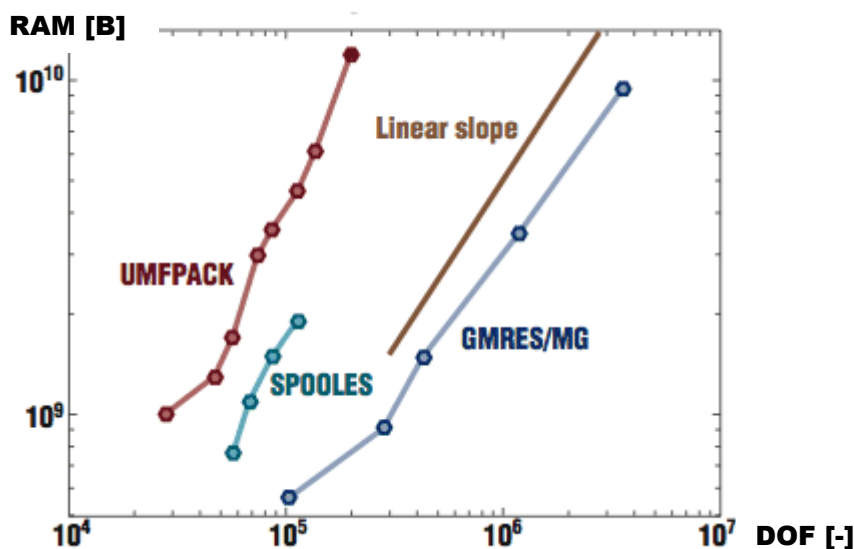
Z důvodu optimalizace složitosti sítě je zjednodušena oblast šikmého roštu. Původních 110 děr o $\varnothing 4$ mm s celkovým průtočným průřezem $691,15 \text{ mm}^2$ je nahrazeno 28 dírami o $\varnothing 8$ mm s celkovým průtočným průřezem $703,72 \text{ mm}^2$, čímž vznikla chyba přibližně 1,8 %. Tato chyba je dostatečně malá a tudíž příliš neovlivňuje výsledné řešení.



Obr. 9 - vnitřní hranice sítě výpočetní oblasti

Výsledná průměrná hodnota kvality sítě je 0,76 a minimální hodnota sítě 0,021 při počtu prvků 1.119.564 a cca 803.666 DOF. Zjednodušením došlo k poklesu kvantitativních hodnot téměř na polovinu, přičemž kvalitativní hodnoty jsou nedotčeny.

Na Obr. 10 je možné vidět vliv počtu stupňů volnosti na množství potřebné operační paměti. Je zřejmé, že i poměrně malé zjednodušení modelu může výrazně snížit nezbytný výkon výpočetního zařízení a celkový výpočetní čas. Zároveň je zřejmá vhodnost řešičů pro jednotlivé úlohy. Pro jednoduché úlohy, případně je-li k dispozici dostatečný výpočetní výkon, je vhodný UMFPAK, zatímco s klesajícím výkonem a narůstající rozsáhlostí sítě je zapotřebí používat pomalejší řešiče jako SPOOLES, GMRES či MultiGrid. V případě této úlohy je využívána kombinace SPOOLES, GMRES a MultiGrid.



Obr. 10 - závislost používané operační paměti na počtu stupňů volnosti (DOF) [19]

4.3 Definování okrajových podmínek pro laminární proudění

Okrajové podmínky jsou definovány v těchto místech:

a) *čelní hraniční plocha přívodu primárního vzduchu* - na základě [18] je stanovena hodnota hmotnostního toku součtu primárního a sekundárního vzduchu $322,6 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$. Na základě znalosti obecného pravidla připadá na primární vzduch přibližně 40 % tohoto množství. Výsledná hodnota v základních jednotkách je $3,58 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ při termodynamické teplotě $472,65 \text{ K}$. Hmotnostní tok je rovnoměrně rozložen po hraniční ploše a uvažuje se normálové laminární proudění.

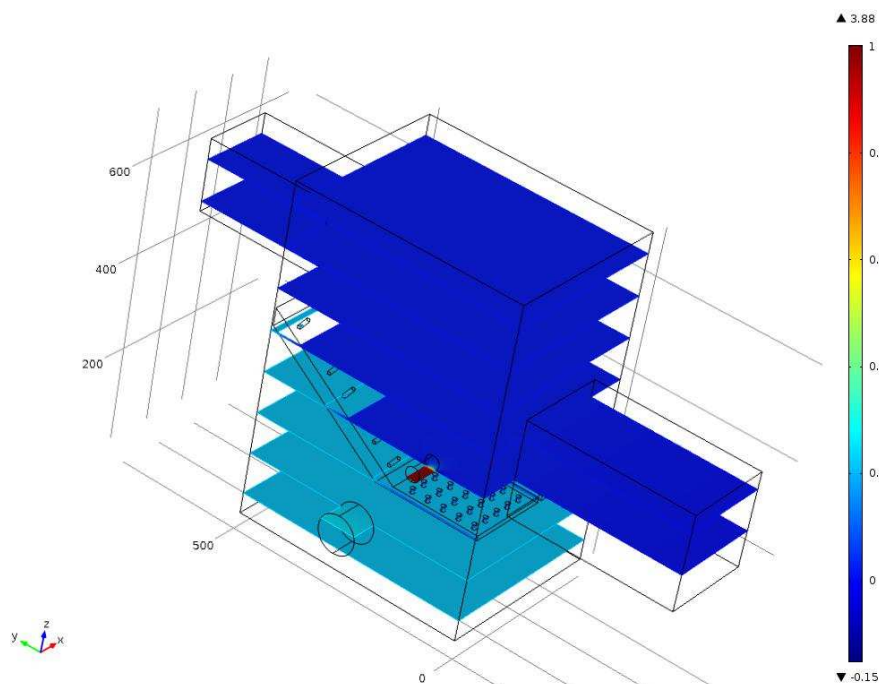
b) *čelní hraniční plocha přívodu sekundárního vzduchu* - na základě znalosti obecného pravidla připadá na sekundární vzduch přibližně 60 % množství hmotnostního toku uvedeného výše. Výsledná hodnota v základních jednotkách je $5,38 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ při termodynamické teplotě $472,65 \text{ K}$. Hmotnostní tok je rovněž rovnoměrně rozložen po hraniční ploše a uvažuje se normálové laminární proudění.

c) *čelní hraniční plocha výstupního otvoru pro spalínovod* - pro definici okrajové podmínky výstupního otvoru je využita znalost referenčního atmosférického tlaku, na jehož hodnotu se musí výstupní spaliny vyrovnat. Jelikož však COMSOL pracuje s relativními hodnotami, je hodnota tlaku definována nulovou hodnotou.

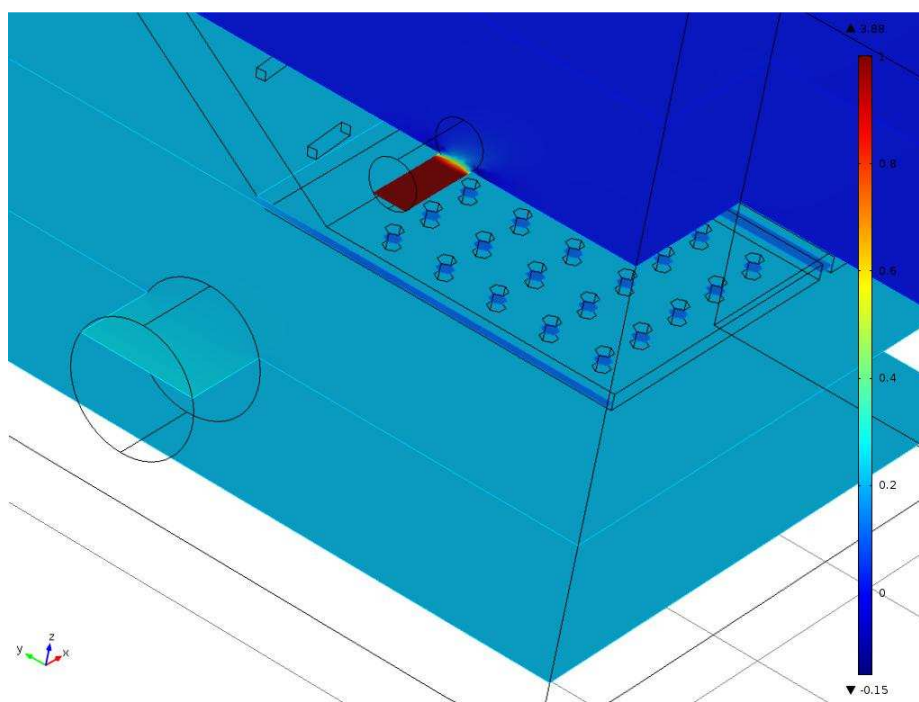
4.4 Výsledky numerického řešení laminárního proudění studeného vzduchu

4.4.1 Rozložení tlaku ve spalovací komoře

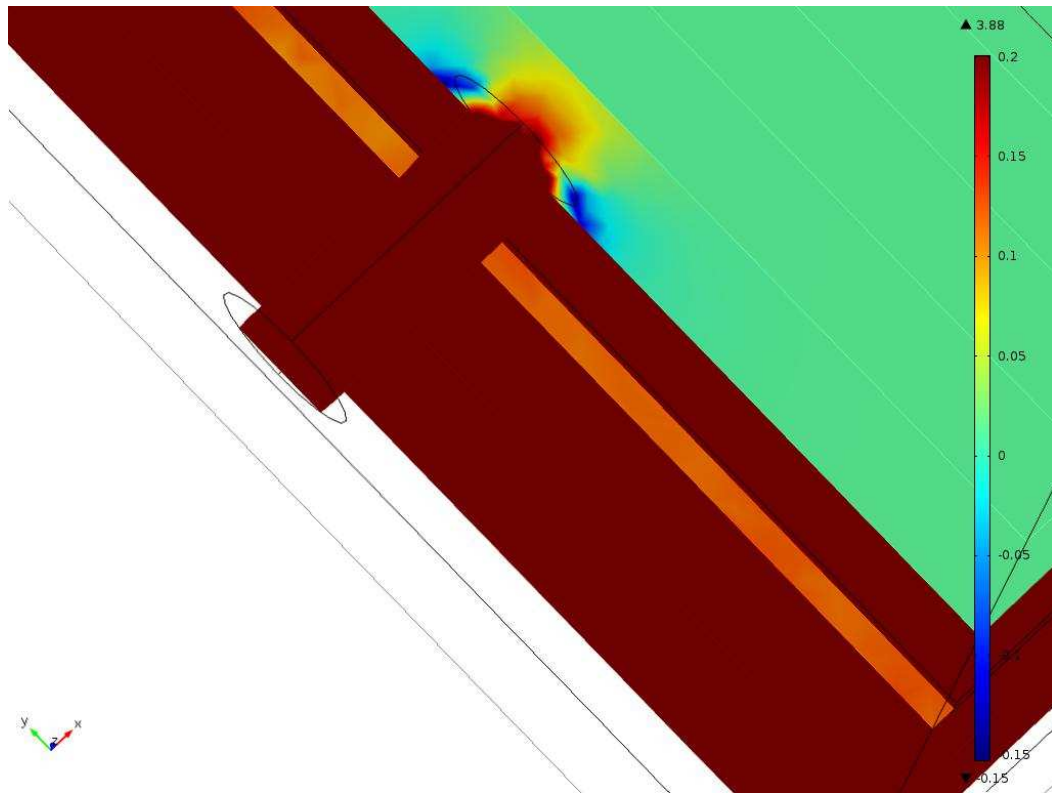
Z grafů rozložení tlaku je zřejmé, že ve spodní části komory, tj. pod roštem, je malý přetlak cca 0,4 Pa, a v oblasti nad roštem se tlak srovnává na atmosférický. Záporné hodnoty tlaku, tj. podtlak (Obr. 13), se objevují v místě vstupu sekundárního vzduchu. Tento jev je pravděpodobně spojen s ejekcí spalovacího vzduchu proudícího ven z přívodu vysokou rychlostí.



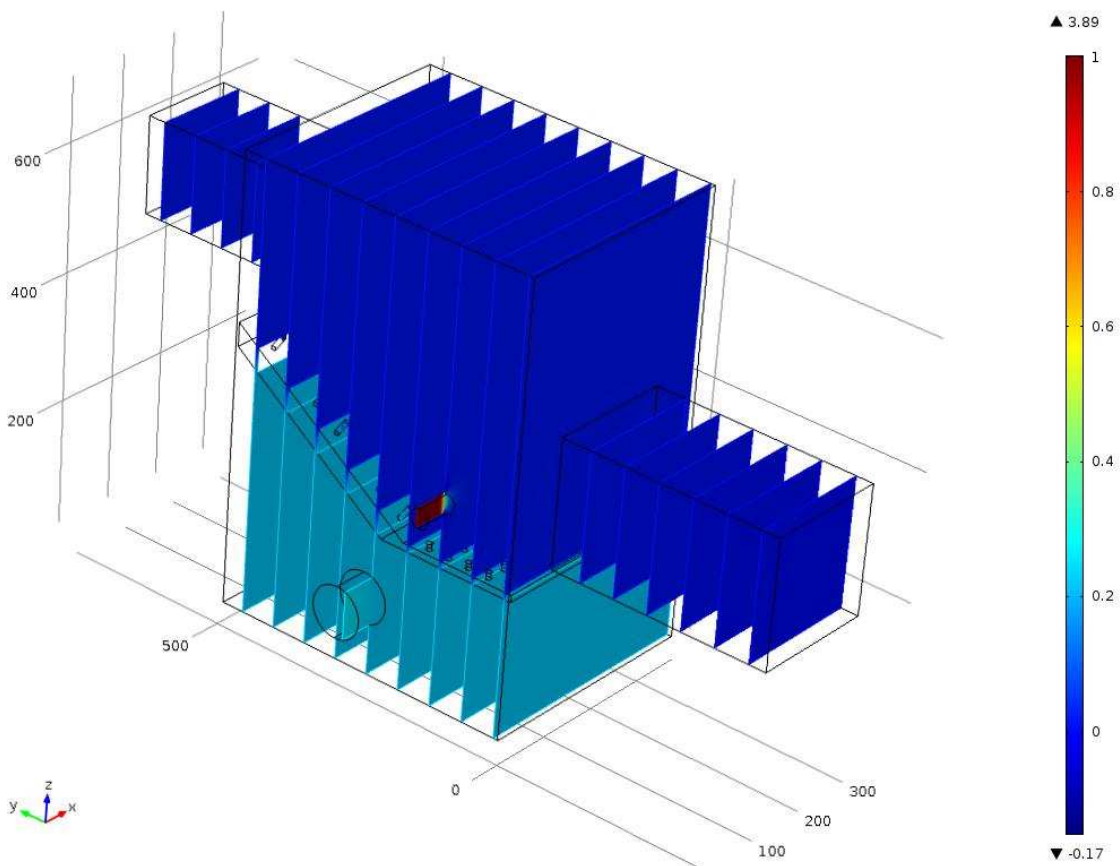
Obr. 11 - rozložení tlaku ve spalovací komoře na horizontálních plochách



Obr. 12 - detail rozložení tlaku ve spalovací komoře na horizontálních plochách



Obr. 13 - detail rozložení tlaku u vstupu sekundárního vzduchu v horizontálních plochách



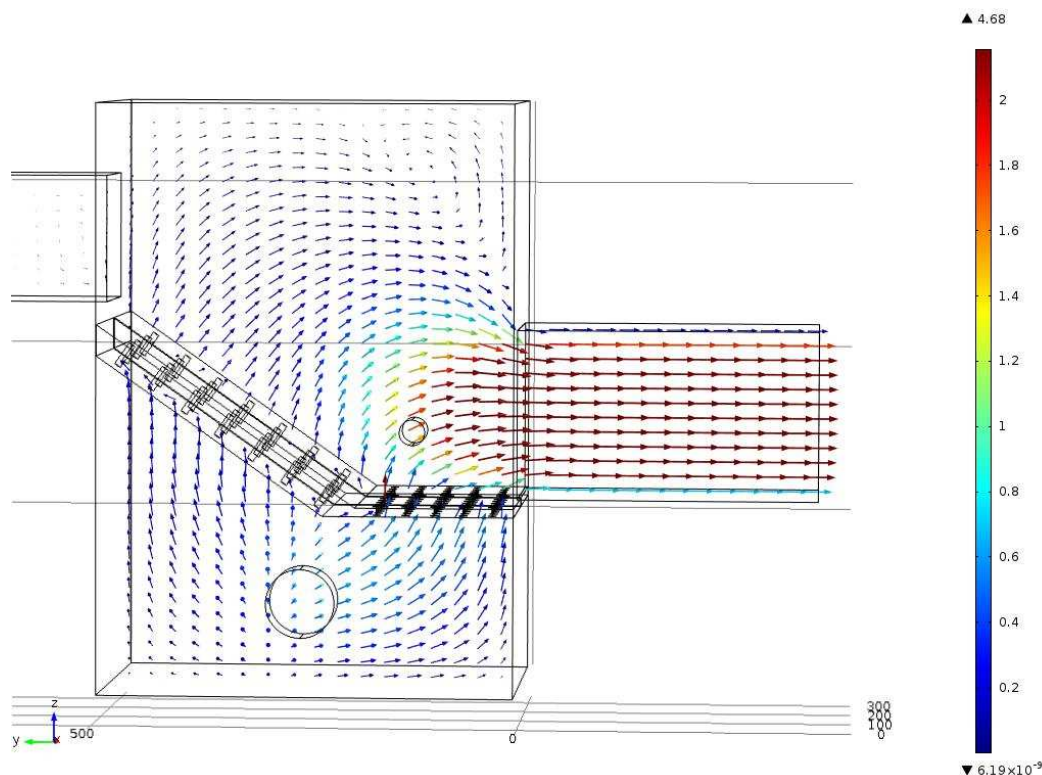
Obr. 14 - detail rozložení tlaku u vstupu sekundárního vzduchu ve vertikálních plochách

4.4.2 Rozložení rychlosti proudění ve spalovací komoře

Uvedená zobrazení rozložení rychlosti mají upravené rozsahy škály pro jemnější rozlišení jednotlivých oblastí. Vlivem této úpravy však nejsou pozorovatelné přesné rychlosti proudu spalin, vstupu primárního vzduchu a sekundárního vzduchu. Škálou stupnice se určila maximální rychlost vstupního proudu primárního vzduchu $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, maximální rychlost vstupního proudu sekundárního vzduchu¹⁰ až $188 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a maximální rychlost výstupního proudu spalin $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

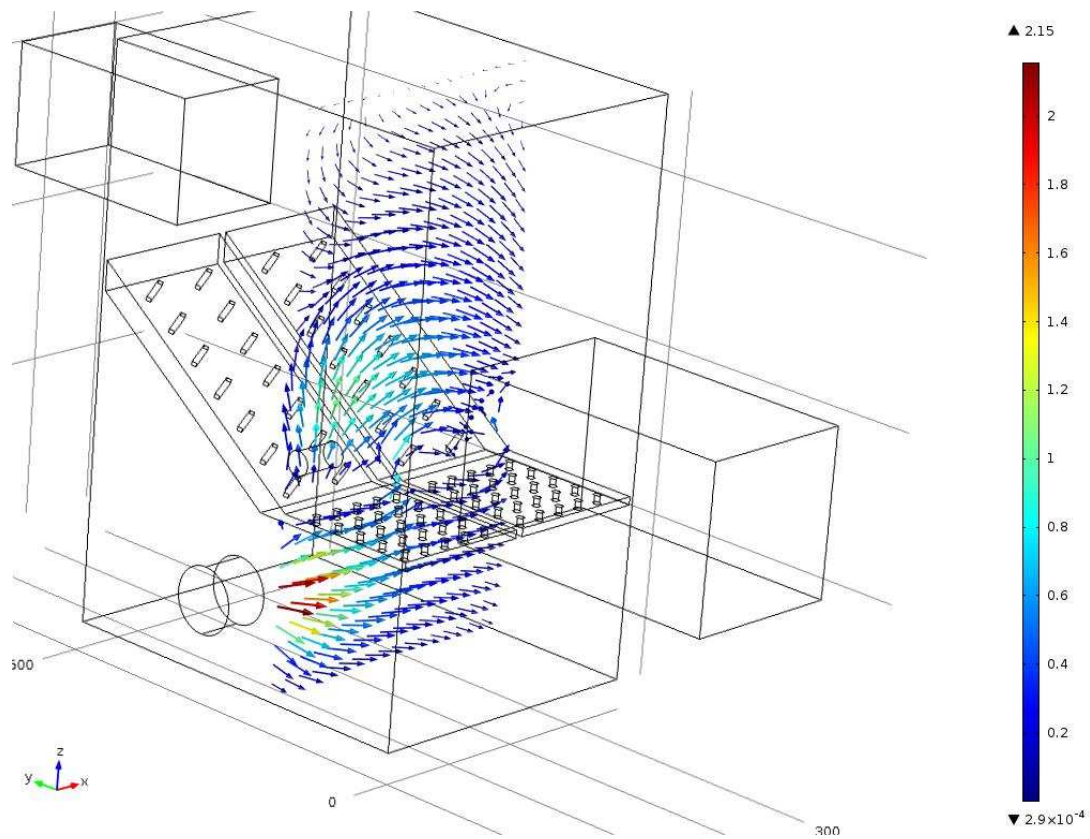
Souvislý proud primárního i sekundárního vzduchu se ihned po vstupu do spalovací komory rozpadá a rozpíná se do větší šířky, čímž dochází k prudkému poklesu rychlosti. Rychlost proudění primárního vzduchu pod roštem klesá k hodnotám mezi $0,5 \div 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ přičemž mírně narůstá při průchodu roštem, místy až k hodnotě $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Z uvedených zobrazení proudnic je zřejmé, že majoritní část spalovacího vzduchu prochází rovinným roštem a skrz šikmý rošt tak proudí méně primárního vzduchu. Je pravděpodobné, že rychlost proudění primárního vzduchu není příliš důležitá pro distribuci vzduchu pod roštem.

Proud sekundárního spalovacího vzduchu proudí spalovacím prostorem rychlostí mezi $0,5 \div 2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Většina sekundárního vzduchu je pouze nad rovinným roštem a nezasahuje do oblasti šikmého roštu, což zkracuje čas promíchávání prchavé hořlaviny se spalovacím vzduchem.

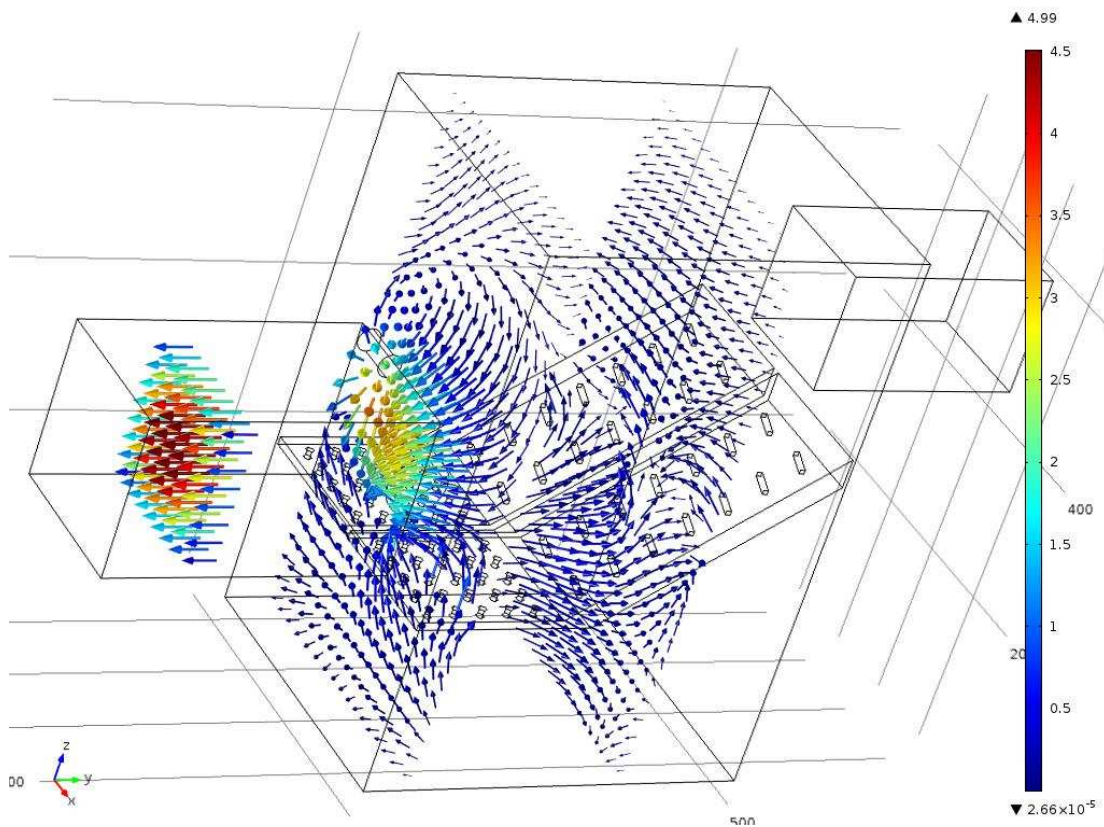


Obr. 15 - vektorové pole rychlosti proudění v rovině y-z procházející středem komory

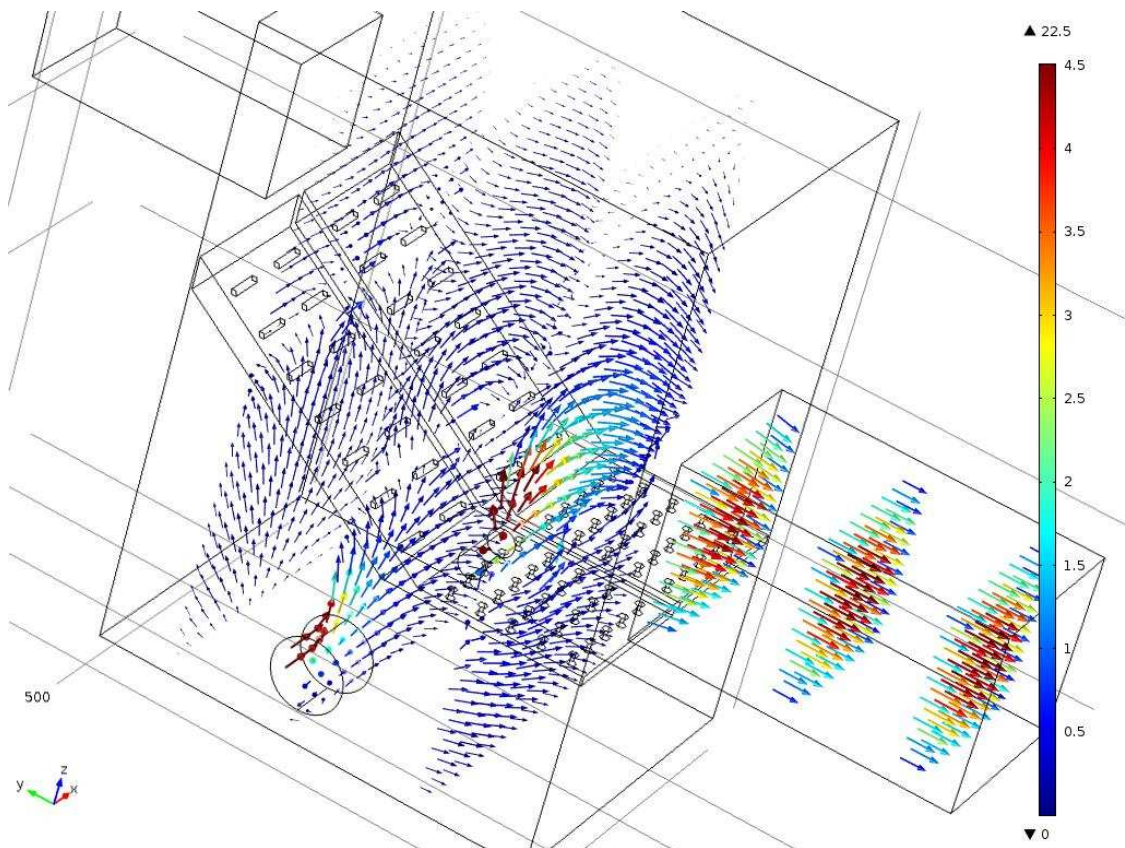
¹⁰ tato značně nerealistická hodnota je pravděpodobně způsobena užitím laminárního proudění. U takto rychlého proudu vzduchu lze předpokládat turbulentní charakter proudění.



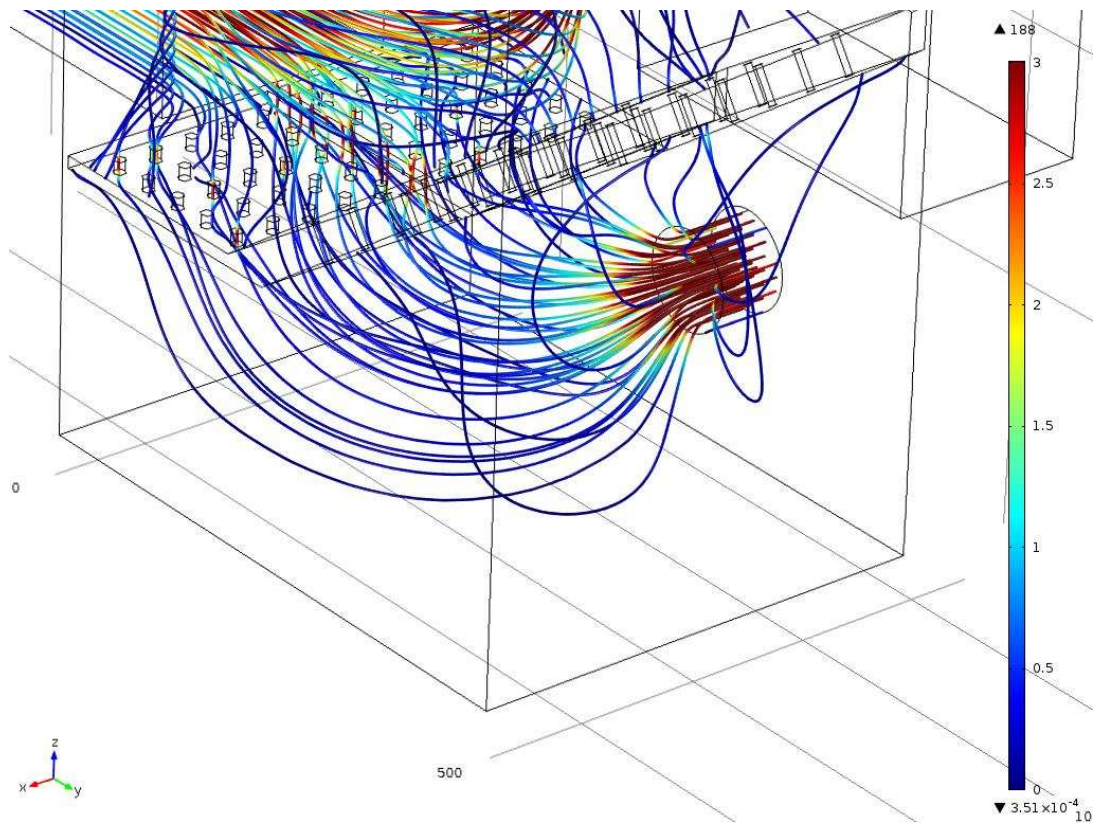
Obr. 16 - vektorové pole rychlosti proudění v rovině x-z procházející rovinným roštem



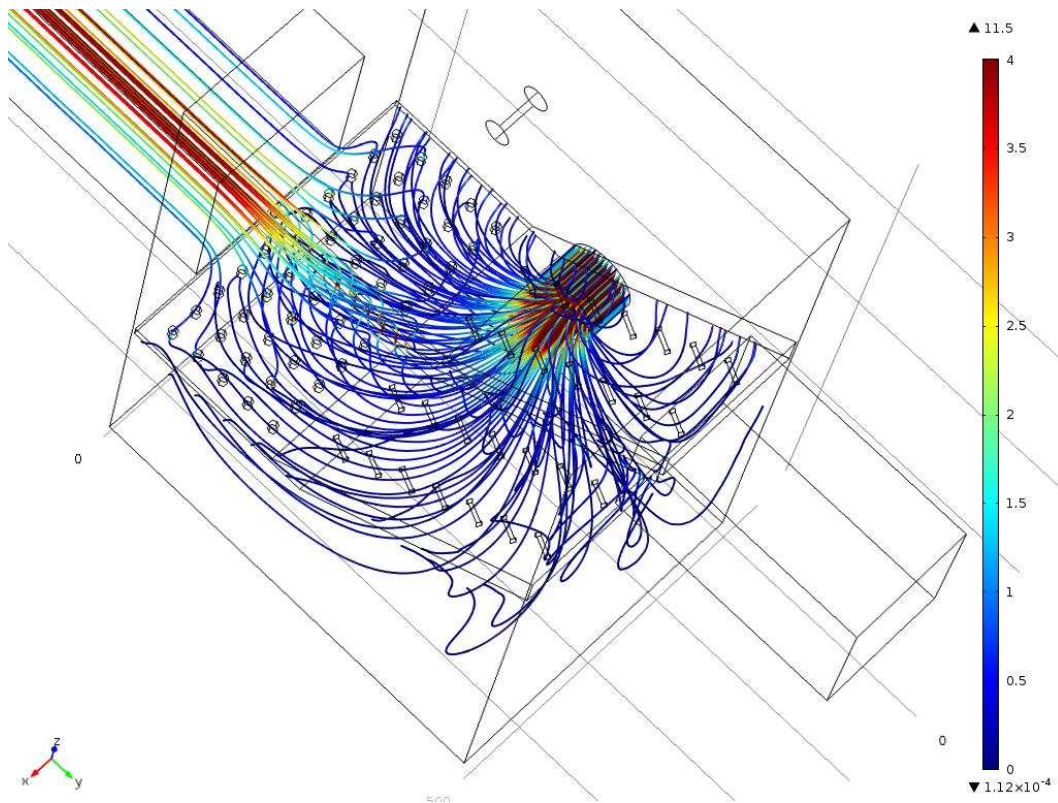
Obr. 17 - vektorové pole rychlosti proudění v rovinách x-z



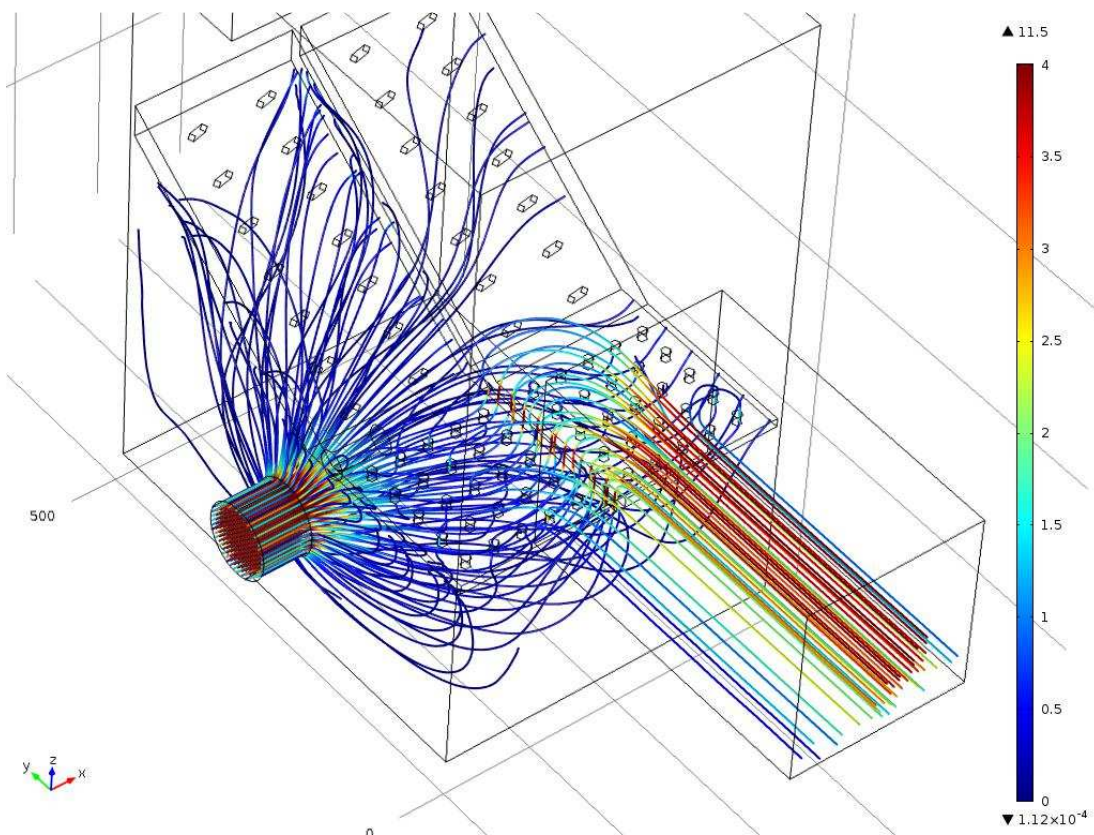
Obr. 18 - vektorové pole rychlosti proudění v rovinách x-z



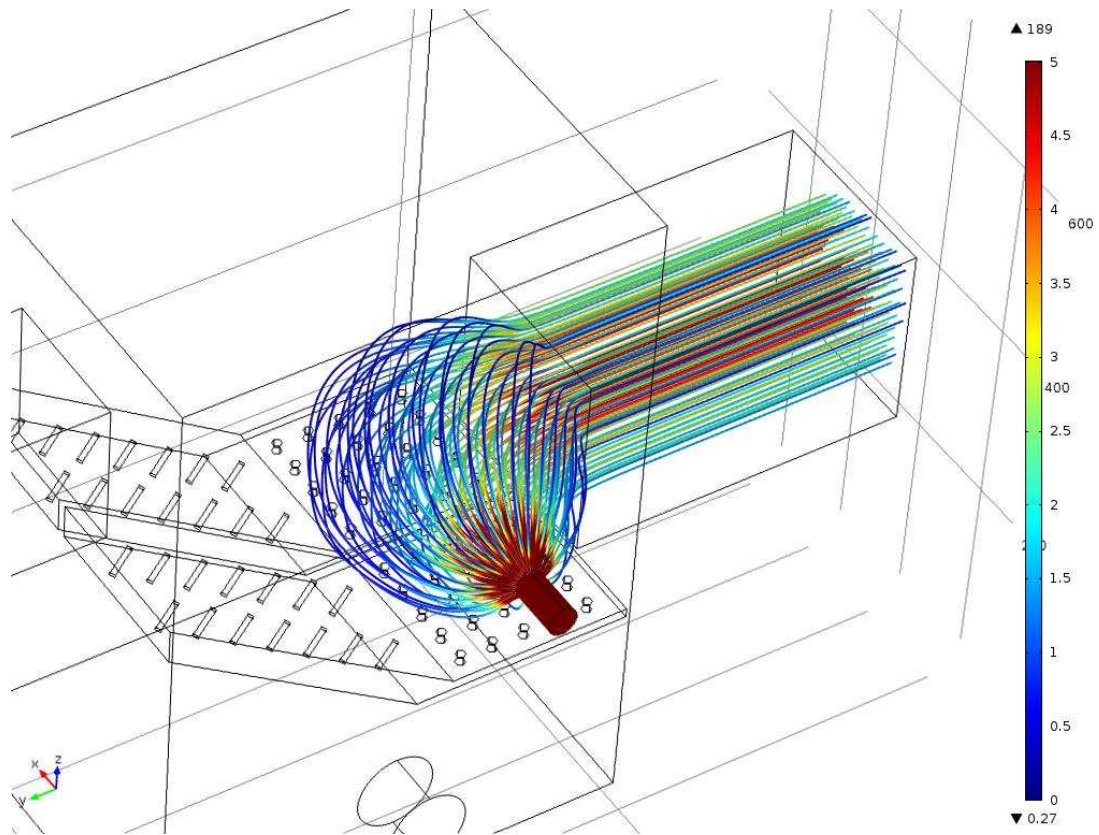
Obr. 19 - proudnice primárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti proudění



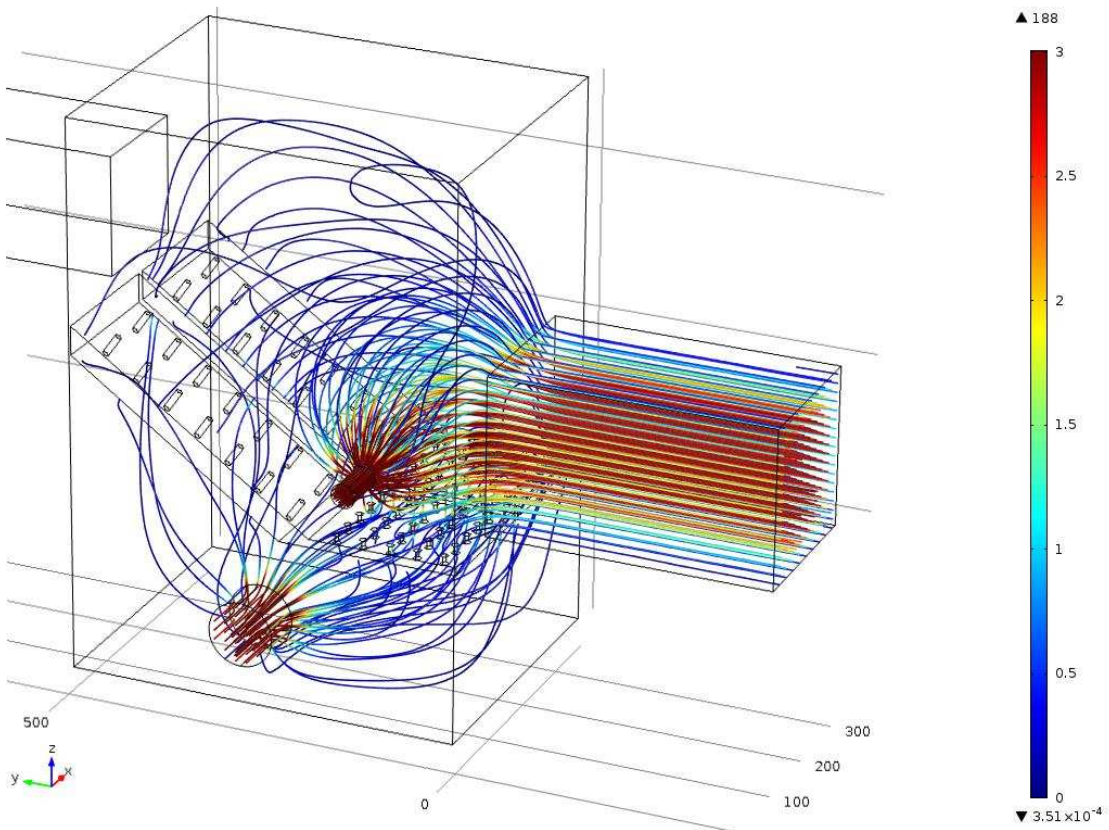
Obr. 20 - proudnice primárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti proudění



Obr. 21 - proudnice primárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti proudění



Obr. 22 - proudnice sekundárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti proudění



Obr. 23 - proudnice spalovacího vzduchu se škálou odpovídající rychlosti proudění

4.5 Definování okrajových podmínek pro turbulentní proudění

Výpočet turbulentního proudění je značně náročný na výkon a především na výpočetní čas, přičemž je obtížné dosáhnout konvergence výpočtu. Z těchto důvodů je narozdíl od laminárního proudění využito zadání vstupních rychlostí spalovacího vzduchu namísto hmotnostního toku. Teplota spalovacího vzduchu je ponechána na hodnotě 293,15 K.

Okrajové podmínky jsou definovány v těchto místech:

- a) *čelní hraniční plocha přívodu primárního vzduchu* - uvažuje se vstupní proud kolmý na hraniční plochu o rychlosti $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tato hodnota je stanovena s přihlédnutím na výsledky laminárního proudění.
- b) *čelní hraniční plocha přívodu sekundárního vzduchu* - uvažuje se vstupní proud kolmý na hraniční plochu o rychlosti $9,35 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tato hodnota rovněž vyplývá z výsledků laminárního proudění.
- c) *čelní hraniční plocha výstupního otvoru pro spalinovod* - uvažuje se proud vystupující z výpočetní oblasti, který na této hranici znovu dosahuje hodnoty atmosférického tlaku. Proud může procházet hranicí jako turbulentní.

4.6 Úprava původního výpočetního modelu

Z výše uvedených důvodů je výpočetní model pro turbulentní proudění výrazně zjednodušen. Proporce jsou podobné původnímu modelu, avšak je mírně upravena velikost vstupu sekundárního vzduchu a odstraněn příkladací otvor. Dále jsou odstraněny průduchy na vodorovném roštu, který je zkrácen.

Cílem této práce je především stanovit charakter proudění a popsat pravděpodobné jevy uvnitř spalovací komory. Z tohoto důvodu lze takto radikální zjednodušení provést. Výsledné hodnoty rychlostí a tlaků však nelze považovat za relevantní.

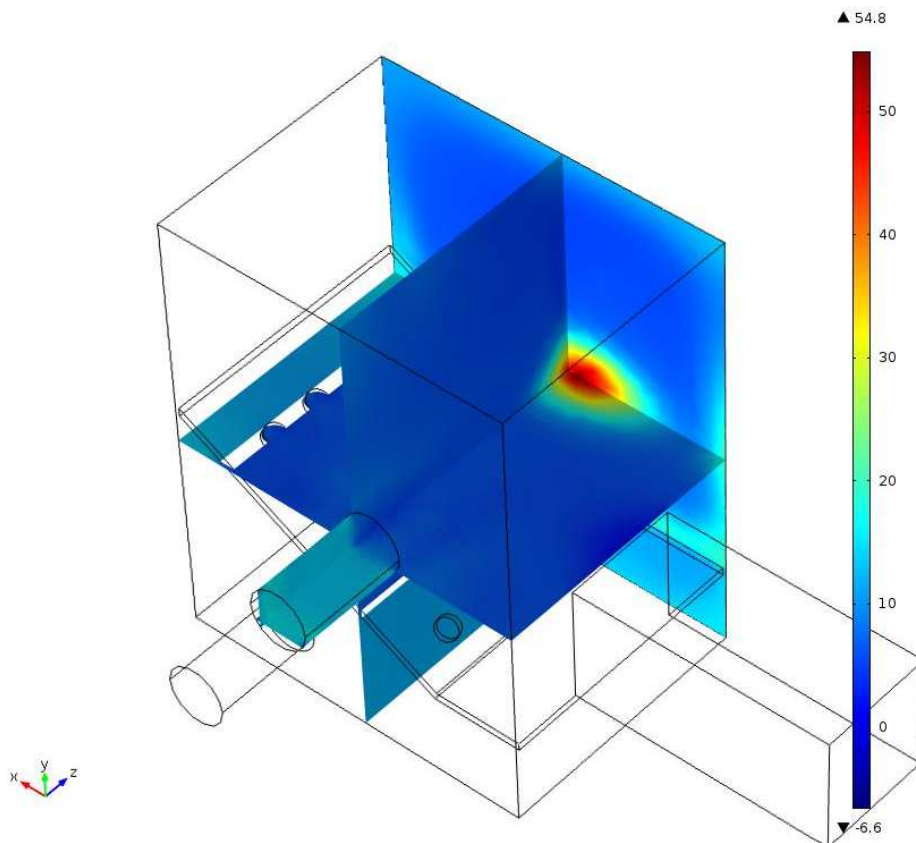
4.7 Výsledky numerického řešení turbulentního proudění studeného vzduchu

4.7.1 Rozložení tlaku ve spalovací komoře

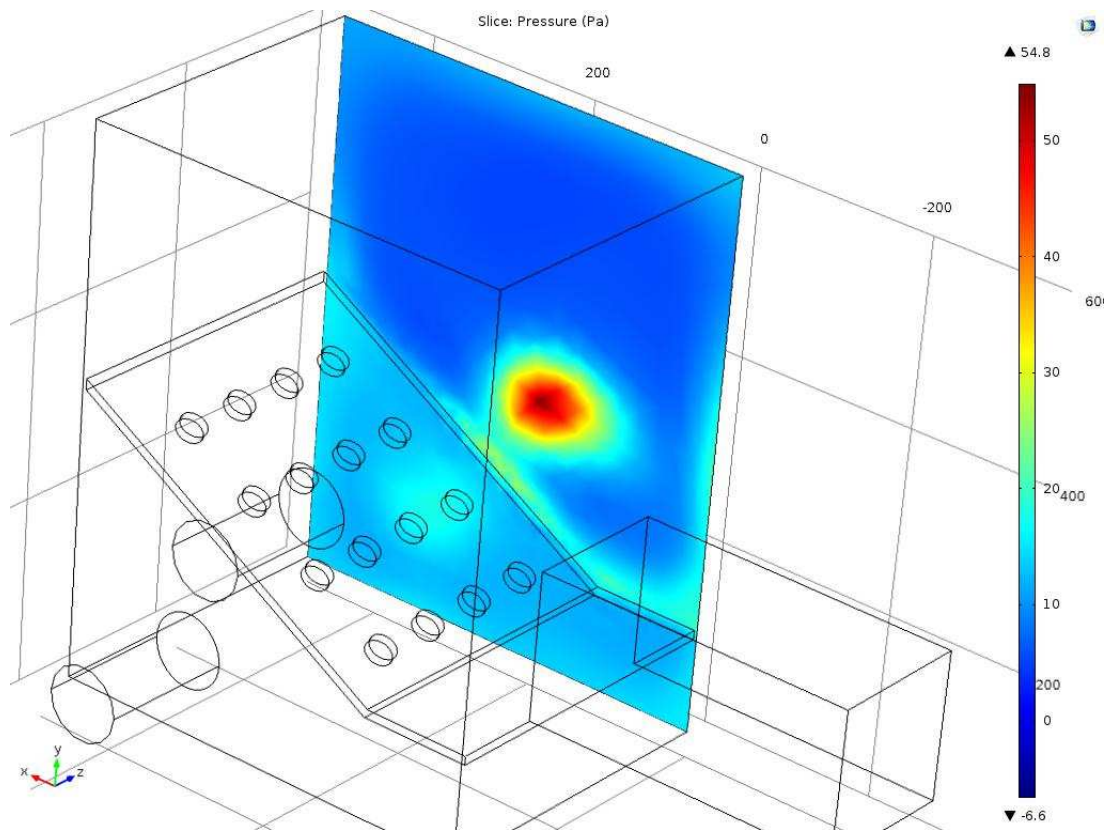
Z níže uvedených grafů je zřejmé, že část komory pod roštem je v malém přetlaku. Poněkud vyšší tlak lze rozpoznat na ose vstupu primárního vzduchu. Tento fakt potvrzuje mírně vyšší tlak na stěně spalovací komory, viz Obr. 25.

Při průchodu spalovacího vzduchu roštem dochází ke tlakové ztrátě a snížení tlaku na nižší hodnoty. Nízký tlak je majoritní v celé oblasti nad roštem. Výjimku tvoří proud sekundárního vzduchu, který naráží na protější stěnu spalovací komory a tříští se o ni. Mírně zvýšený tlak je rovněž podél stěn.

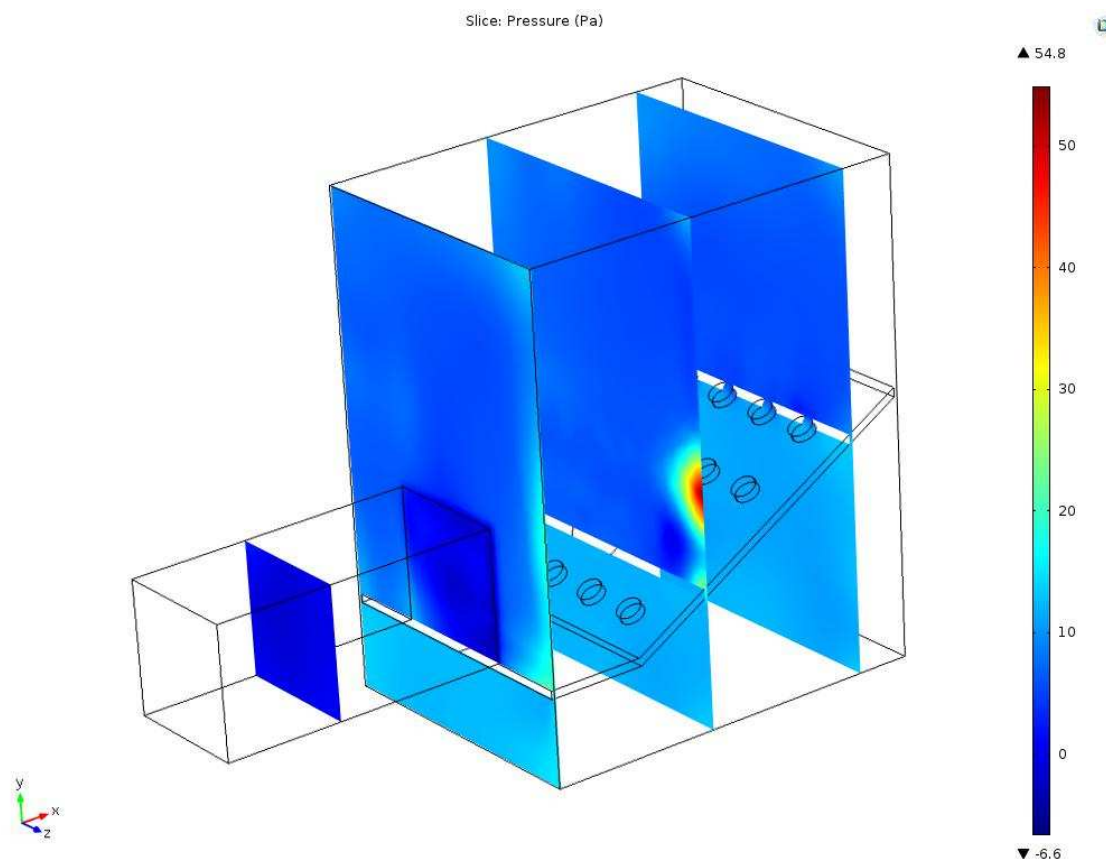
Zvýšený tlak je také ve spodní části vstupu do spalinovodu viz Obr. 26, kde lze očekávat částečný únik sekundárního vzduchu ejekcí proudu spalin a obtékání plamene z důvodu vysoké viskozity horkého vzduchu.



Obr. 24 - rozložení tlaku v prostoru mezi vstupem sekundárního vzduchu a protější stěnou



Obr. 25 - rozložení tlaku na stěně spalovací komory



Obr. 26 - rozložení tlaku ve spalovací komoře

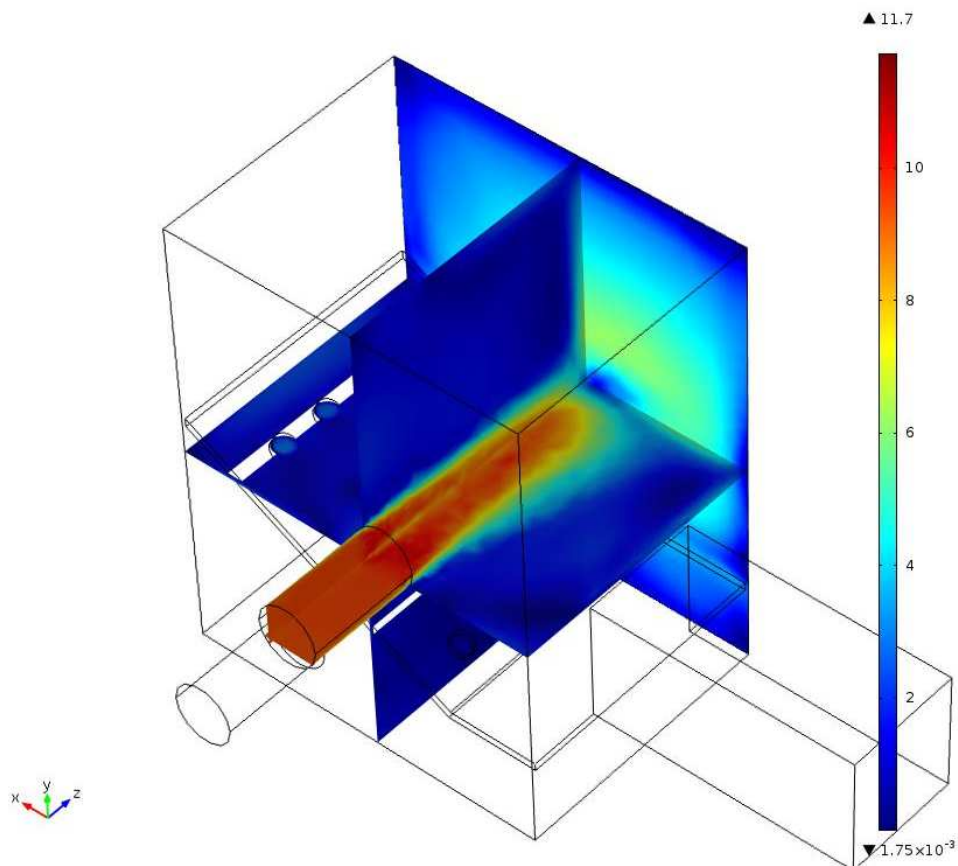
4.7.2 Rozložení rychlosti proudění ve spalovací komoře

Dle vektorového pole rychlosti viz Obr. 29 je zřejmé, že primární vzduch má tendenci opouštět prostor pod roštem mezerou mezi roštem a zadní stěnou. Pravděpodobnost tohoto jevu je posílena zvýšenou viskozitou plamene. Předchozí úsudek o zvýšeném tlaku při tříštění proudu primárního vzduchu o stěnu spalovací komory potvrzuje poměrně vysoká rychlost proudu, přičemž se jeho směr mění až při nárazu na stěnu.

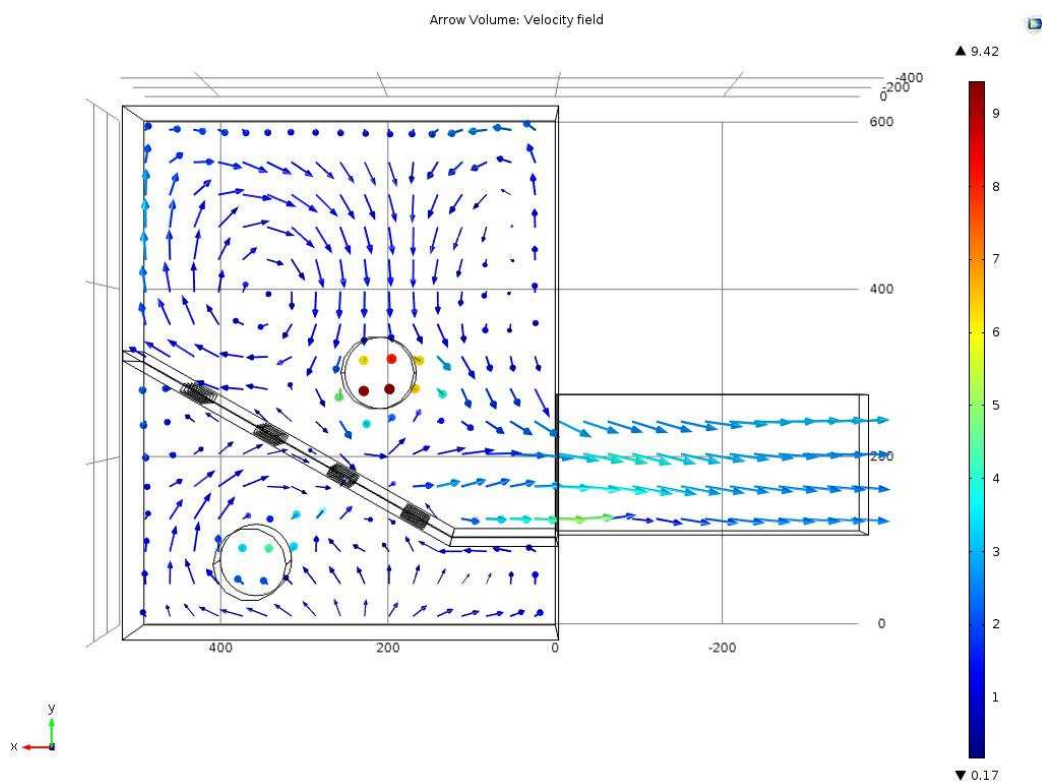
Podobný jev lze rozpoznat u proudu sekundárního vzduchu viz Obr. 27 a Obr. 30, který se rovněž tříští o stěnu. Sekundární vzduch proudí poměrně vysokou rychlostí a po roztržení o zadní stěnu větší část opouští spalovací prostor směrem do spalínovodu. Zbývá menší část směřuje vzhůru podél stěny a obtéká horní plochu spalovacího prostoru směrem do spalínovodu.

Na Obr. 28 lze rozpoznat vířivé struktury ve střední části komory, které přivádějí malé množství spalovacího vzduchu do zadní části spalovací komory. Dále je zřejmé klesání spalovacího vzduchu z prostoru pod horní plochou směrem do spalínovodu a také tendenci primárního vzduchu nevstupovat do zadní části komory.

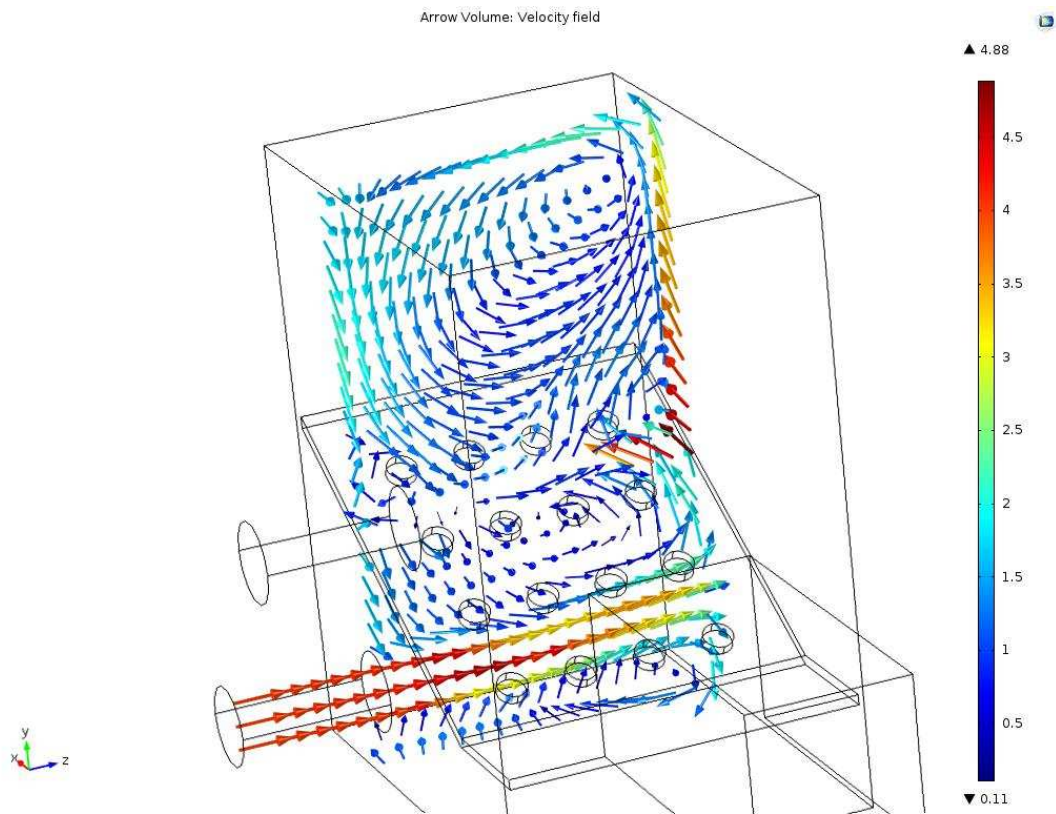
Obr. 31 potvrzuje zvýšení tlaku v dolní části vstupu do spalínovodu nárůstem rychlosti proudění v této oblasti. Spalovací prostor opouští spalovací vzduch jednoznačně výrazně turbulentním prouděním, viz Obr. 34.



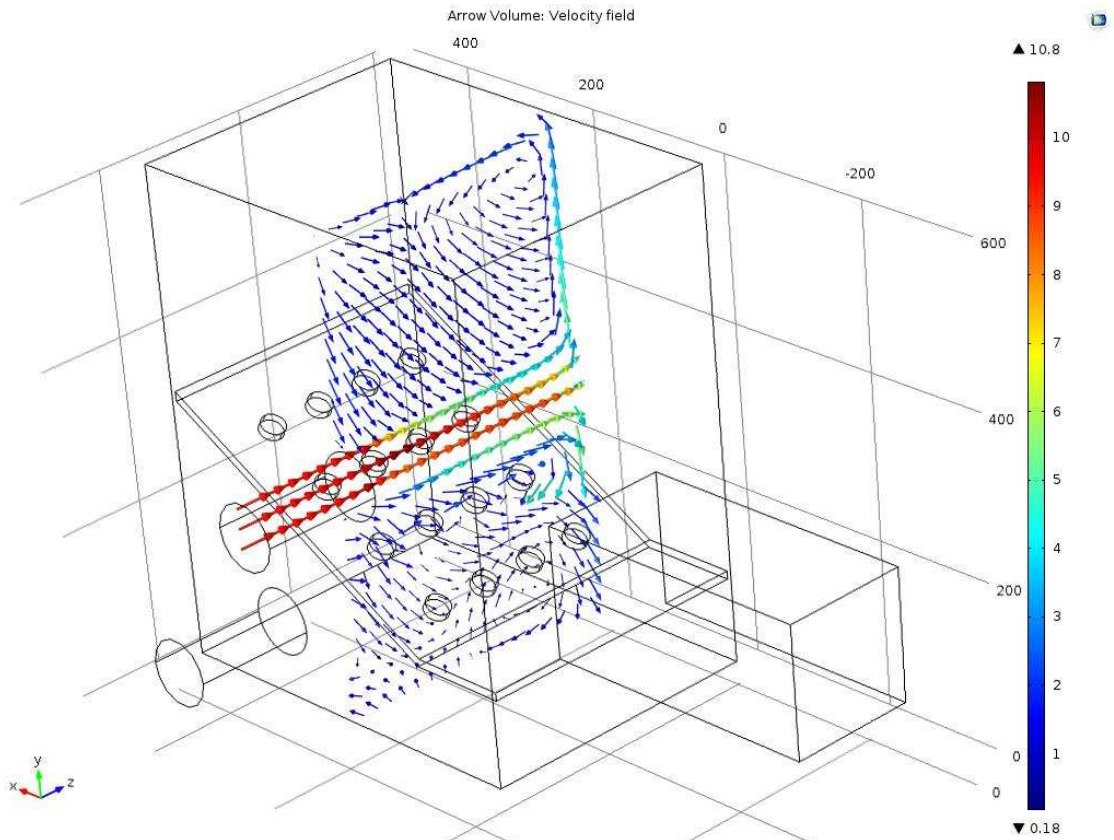
Obr. 27 - rozložení rychlosti vstupujícího sekundárního spalovacího vzduchu



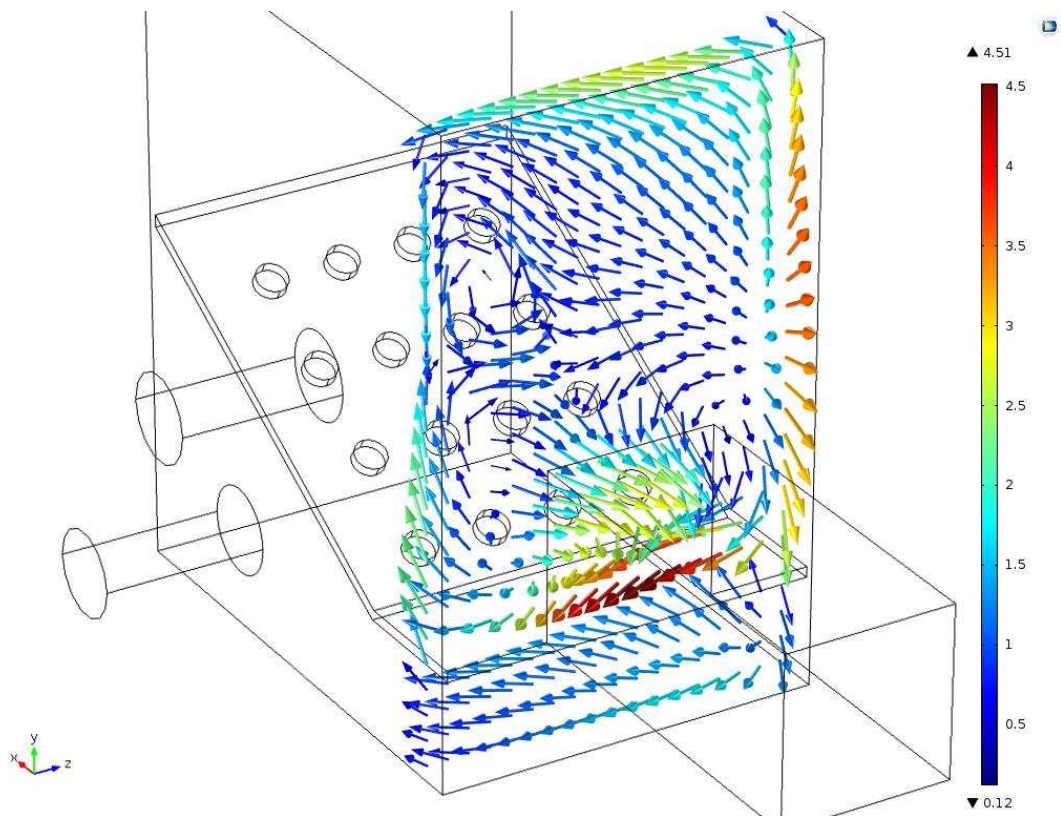
Obr. 28 - vektorové pole rychlosti v rovině x-y vedené středem komory



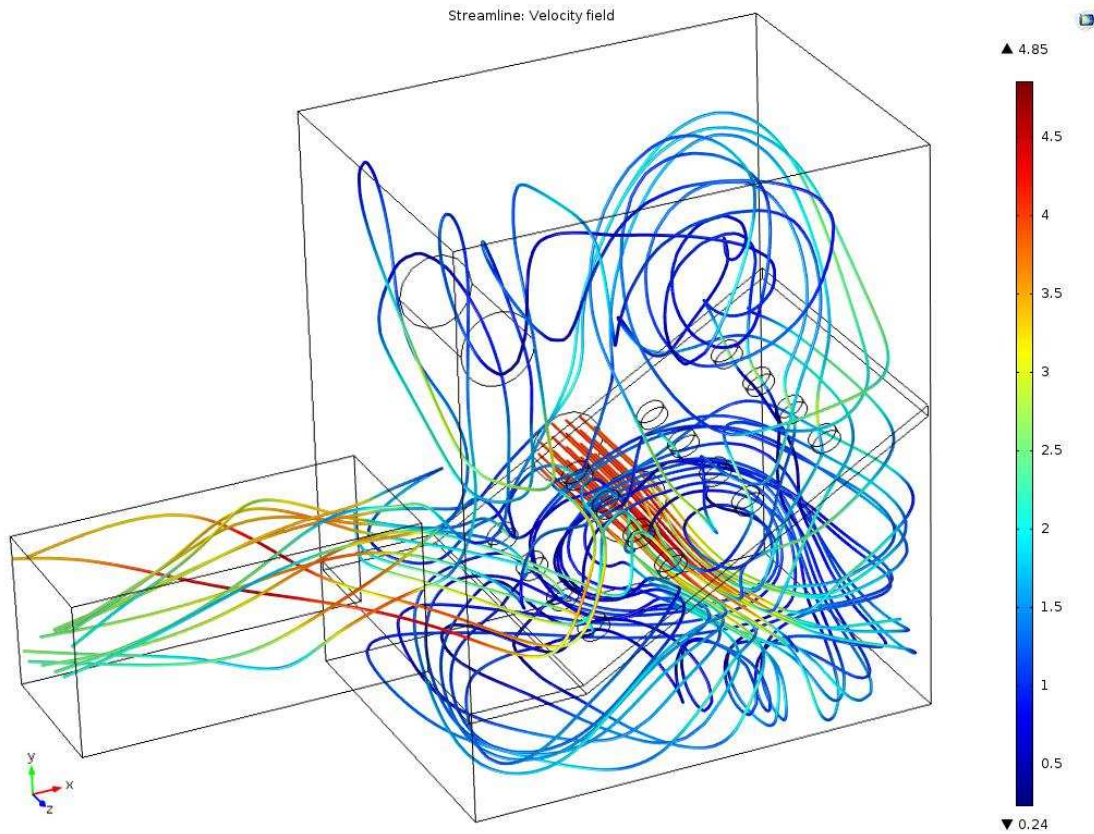
Obr. 29 - vektorové pole rychlosti v rovině y-z vedené osou vstupu primárního vzduchu



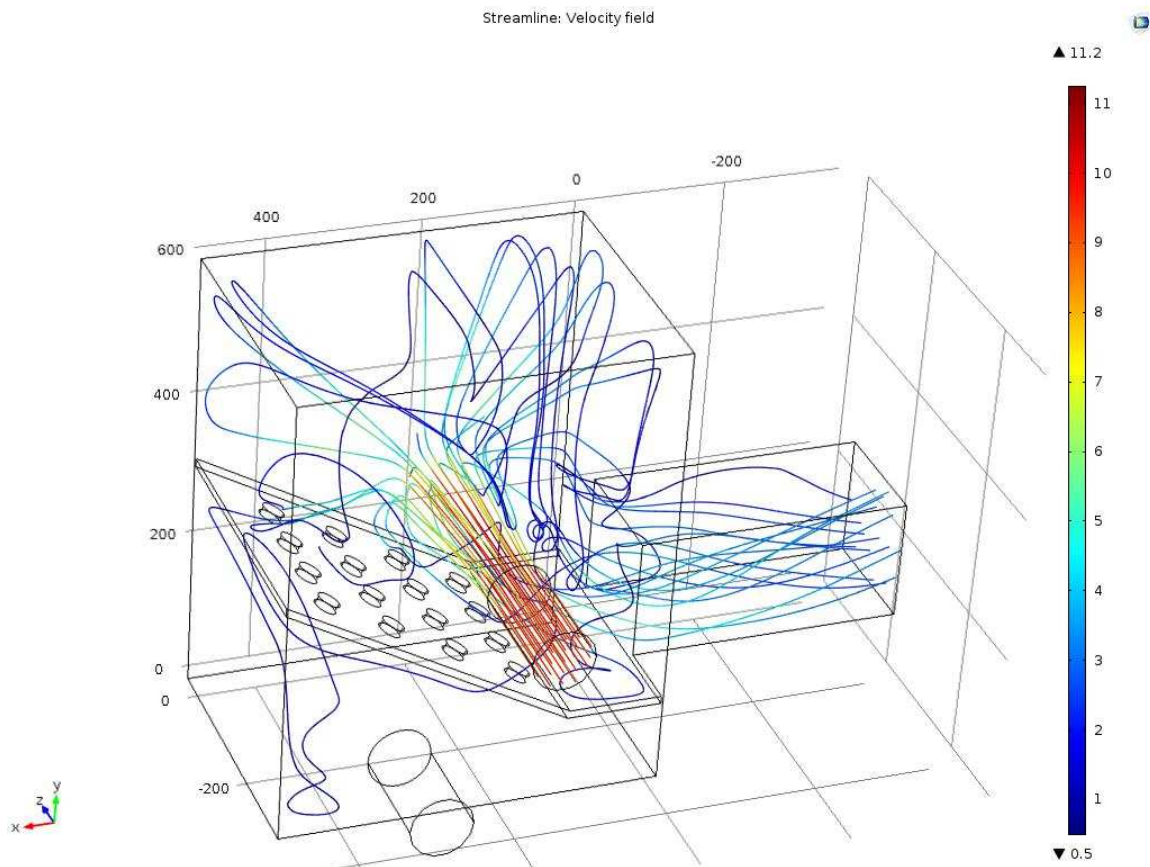
Obr. 30 - vektorové pole rychlosti v rovině y-z vedené osou vstupu sekundárního vzduchu



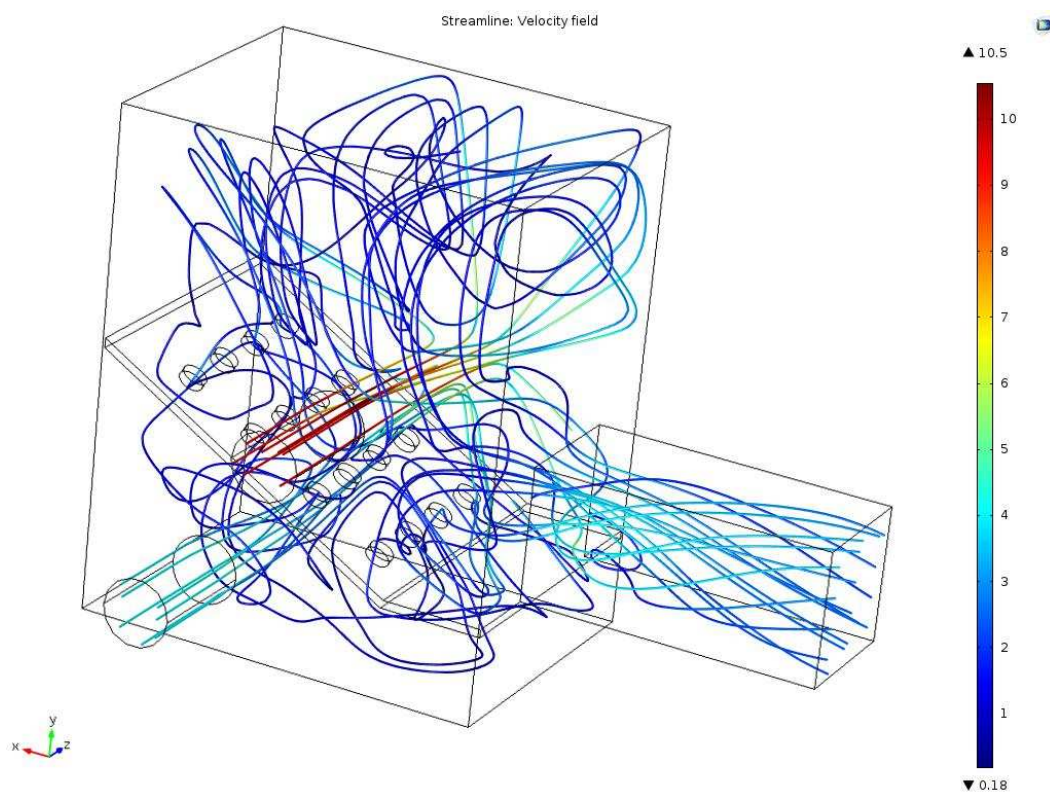
Obr. 31 - vektorové pole rychlosti v rovině y-z v blízkosti výstupního otvoru



Obr. 32 - proudnice primárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti



Obr. 33 - proudnice sekundárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti



Obr. 34 - proudnice spalovacího vzduchu se škálou odpovídající rychlosti

4.8 Analýza získaných výsledků

Výsledky laminárního i turbulentního proudění vedou k podobným závěrům. Primární vzduch je pravděpodobně přiváděn v nedostatečném množství do zadní části spalovací komory. V této oblasti se nachází čerstvé palivo, které je potřeba vysušit. Vysoušení je nejspíše výrazně ztíženo, a tím může docházet ke zpomalení procesu hoření. V přední části spalovacího prostoru může být vytvářen větší přebytek primárního vzduchu než je žádoucí.

Sekundární vzduch má tendenci ve velké míře opouštět spalovací prostor podél stěn přímo do spalinovodu. Je zřejmé, že proud sekundárního vzduchu vysokou rychlostí proudění proráží plamen. Je možné, že prorážením plamene dochází k nežádoucímu nadměrnému ochlazení čerstvého paliva, což může vést k dalšímu zhoršení hoření. Zároveň je sekundární vzduch nedostatečně přiváděn do zadní části spalovací komory.

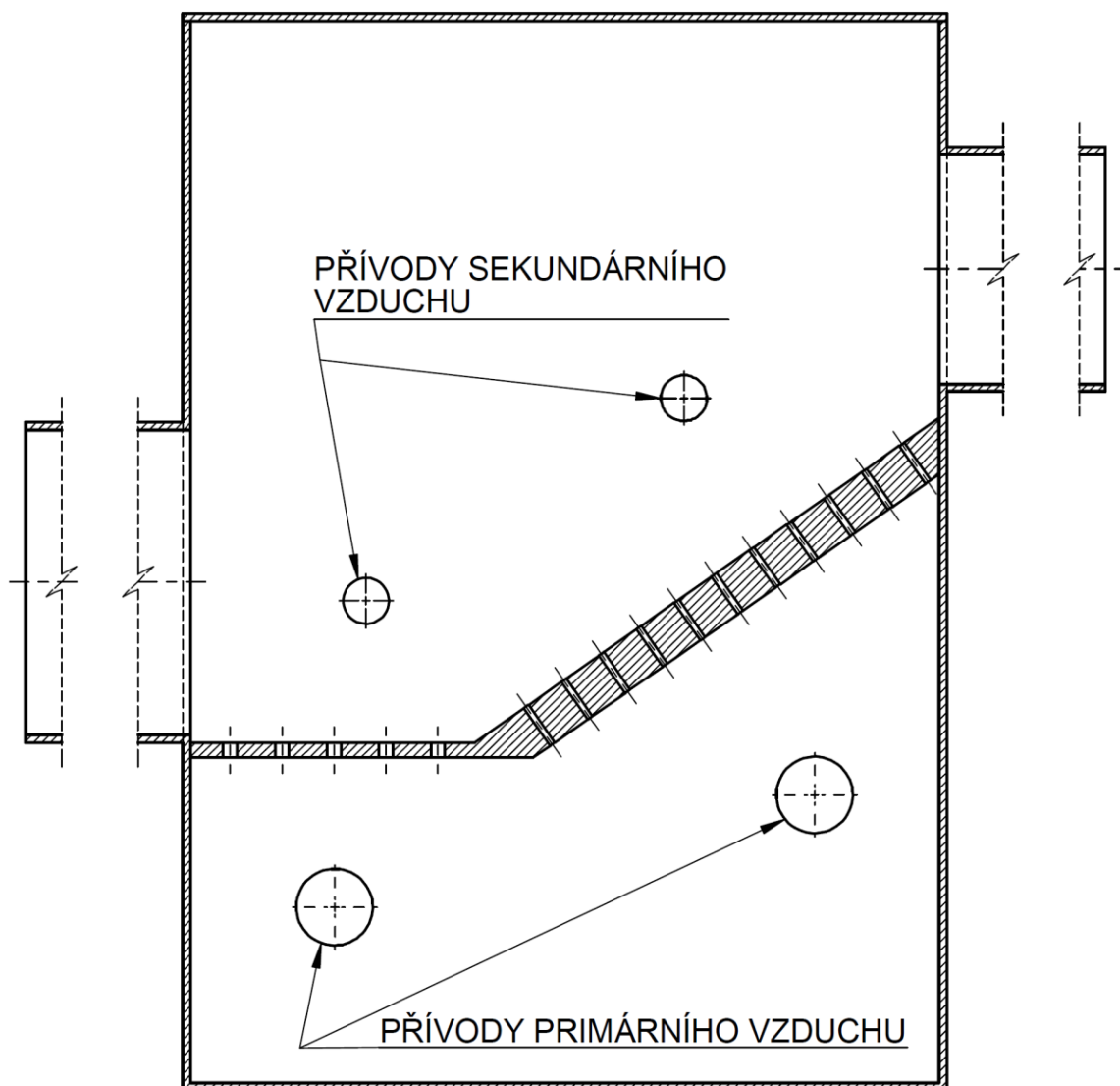
Ve spalovacím prostoru lze rozpoznat několik turbulentních vírů, které jsou pro hoření žádoucí z důvodu promísení spalovacího vzduchu s hořlavinou. V tomto případě však víry intenzivně omílají stěnu a tudíž pravděpodobně zvyšují tepelnou ztrátu přestupem do okolí. Dalším problémem je, že víry vznikají až po roztržení proudu sekundárního vzduchu, kdy dochází k výraznému poklesu rychlosti. Rychlost vírů již pravděpodobně není dostatečná pro efektivní míšení prchavé hořlaviny se spalovacím vzduchem.

Celkově lze očekávat, že část spalovací komory u šikmého roštu má nedostatečný přívod primárního i sekundárního vzduchu. Část spalovací komory s rovinným roštem má pravděpodobně naopak příliš velký přívod spalovacího vzduchu, a tím nejspíše dochází k nadměrnému ochlazení procesu. Souhrně lze prohlásit, že výsledky do jisté míry odpovídají představám i bez provedení simulace, jelikož se nevyskytuje žádný neočekávaný jev. Řešená komora je tudíž nevhodně navržena již v základu.

4.9 Návrh úprav konstrukce

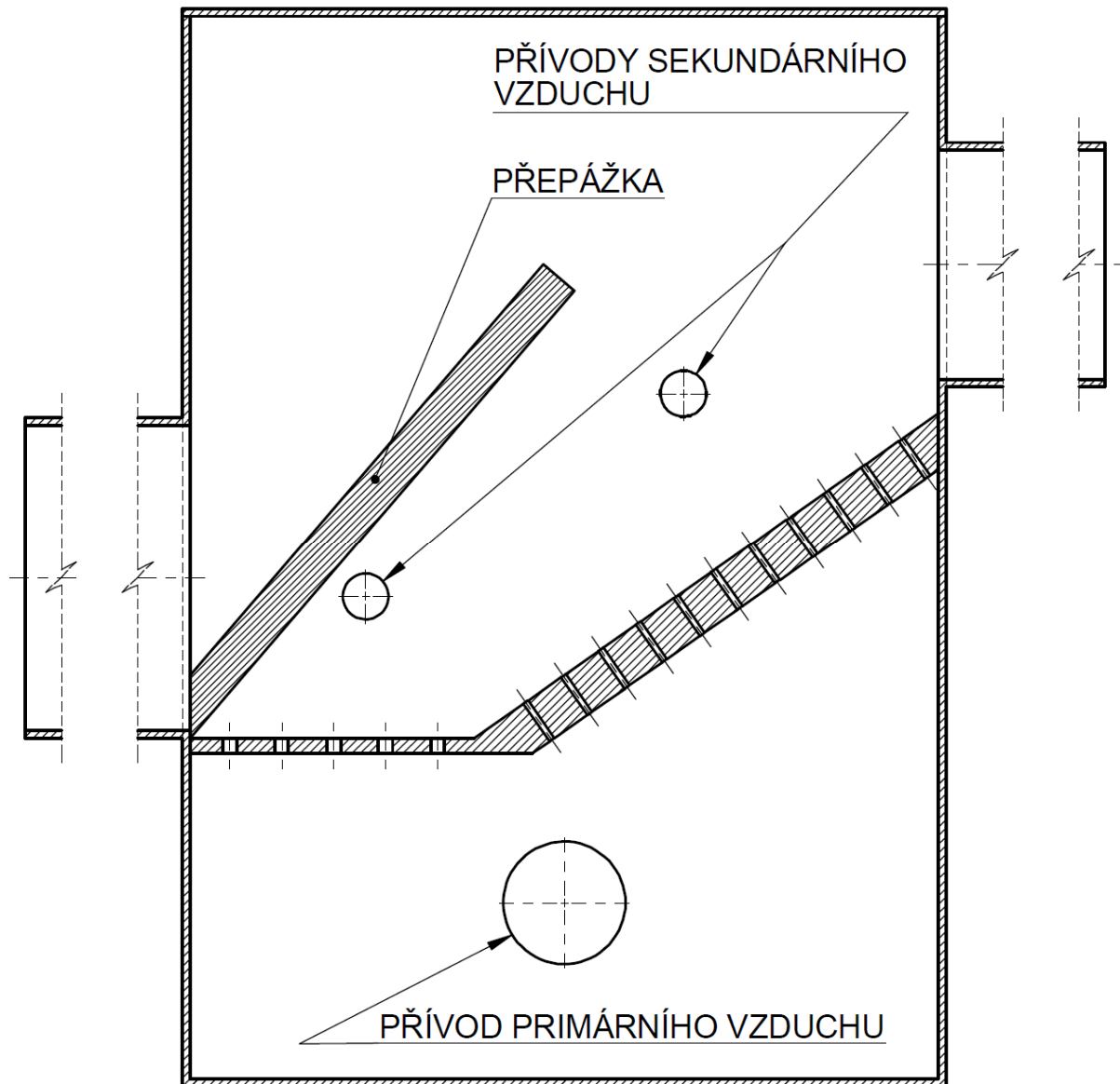
Na základě výše uvedených poznatků lze obecně navrhnout několik možností úprav. Přesné specifikace lze stanovit až s přihlédnutím na ekonomičnost provedení a především na funkčnost ověřenou experimentálně.

a) S přihlédnutím k rozměrům spalovací komory je vhodnější využití dvou přívodů primárního vzduchu. Jednoho v části se šikmým roštem a jednoho v části s roštem rovinným. Pro přívod sekundárního vzduchu je vhodné použití páru trysek s obdobným rozmístěním jako v případě přívodu primárního vzduchu. V lepším případě je pro sekundární vzduch vhodnější rozdělení na dva páry umístěné navzájem proti sobě, viz Obr. 35 .



Obr. 35 - schéma konstrukční úpravy a)

b) Jinou možností je vložení přepážky, která vytvoří labyrint a donutí sekundární vzduch proudit z přední části do zadní a až následně do spalínovodu (současně zkoumané konstrukční řešení analyzovaného kotle). Dále je vhodné rozdělit sekundární vzduch na dvě části obdobně jako v případě a), viz Obr. 36 .



Obr. 36 - schéma konstrukční úpravy b)

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo analyzovat a vysvětlit děje probíhající uvnitř řešené spalovací komory, která vykazuje problémy s hořením a dále navrhnout konstrukční úpravu spalovacího prostoru.

Pro hlubší pochopení procesů probíhajících při hoření bylo nezbytné shromáždit informace o vlastnostech biomasy, způsobech energetických přeměn, vlastnostech popele a spalin. Tyto informace popisují podmínky a jednotlivé vlivy na proces hoření, které umožňují vytvořit si představu o možných problémech spojených s využíváním biomasy.

Dále jsou zkoumána základní konstrukční řešení spalovacích komor a vliv primárního a sekundárního vzduchu na proces hoření. Tato část poskytuje důležité poznatky nezbytné k posouzení jevů probíhajících uvnitř řešené komory spojených s charakterem proudění. Rovněž jsou vysvětleny žádoucí i nežádoucí jevy při proudění spalovacího vzduchu.

Ve třetí kapitole jsou stanoveny parametry řešeného zařízení, včetně jeho schématického nákresu. Toto schéma je zjednodušeno do podoby vhodné pro výpočet pomocí metody konečných prvků.

V poslední části práce jsou popsány jednotlivé kroky nezbytné pro vytvoření výpočetního modelu, včetně vysvětlení problémů spojených s vytvářením sítě a náročnosti výpočtu. Dále jsou popsány okrajové podmínky a nutná zjednodušení. Tato část rovněž zahrnuje grafická zobrazení průběhů tlaku a rychlosti proudění uvnitř spalovací komory pro laminární a turbulentní proudění. V závěru této části jsou popsány jevy probíhající v prostoru spalování, jejich důsledky a návrh konstrukčních úprav.

Tato práce slouží k popsání charakteru proudění a jevů probíhajících uvnitř spalovací komory. Hodnoty tlaku a rychlostí jsou pouze orientační, kvůli několika zjednodušením, která byla nezbytná pro efektivní dosažení výsledku.

Výsledky této práce mohou být základem pro hlubší analýzu řešeného zařízení a dále pro stanovení příčin špatného hoření a jejich nápravy, jak je nastíněno v kapitole 4.9. Shromážděné informace mohou být rovněž podkladem pro návrh nového zařízení, případně jako zdroj informací pro aplikace spojené se spalováním biomasy.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] VOLÁKOVÁ, Pavlína. Prvkové složení biomasy. *Biom.cz* [online]. 2010-09-08 [cit. 2014-11-07]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/prvkove-slozeni-biomasy>
- [2] TOMAN, Zdeněk. Mechanismus a podmínky dokonalého spalování biomasy. *Biom.cz* [online]. 2011-02-07 [cit. 2014-11-01]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/mechanismus-a-podminky-dokonaleho-spalovani-biomasy>
- [3] ČEKANOVÁ, Adéla. 2008. *Chemické složení bioplynu*. Brno. Bakalářská práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 33 s. Vedoucí práce Ing. Zdeněk Beňo.
- [4] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů II*. 2. vyd. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, 152 s. ISBN 978-80-248-1716-3
- [5] Výkladový slovník environmentálních výrazů. *EnviWeb - výkladový slovník environmentálních výrazů* [online]. [cit. 2014-11-08]. ISSN 1803-6686. Dostupné z: <http://enviweb.cz/eslovník>
- [6] BALÁŠ, Marek. *Kotle a výměníky tepla*. 1. vyd. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009, 109 s. ISBN 978-80-214-3955-9
- [7] ZBOŘIL, Martin. 2014. *Návrh úprav biomasového kotle pro velmi vlhká paliva*. Brno. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 94 s. Vedoucí práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [8] JELEMENSKÝ, Ľudovít, Lukáš GAŠPAROVIČ a Josef MARKOŠ. Energetické využití rastlinnej biomasy 2 - Termické procesy. *Biom.cz* [online]. 2013-05-20 [cit. 2014-11-11]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticke-vyuzitie-rastlinnej-biomasy-2-termicke-procesy>
- [9] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů I*. 2. vyd. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2006, 116 s. ISBN 80-248-0076-4
- [10] JUCHELKOVÁ, D. a H. RACLAVSKÁ. Energetické využití biomasy. *Využití biomasy* [online]. 2009-05 [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Index.html
- [11] VOLÁKOVÁ, Pavlína. Biomasový popel - prvkové složení a možnosti jeho využití. *Biom.cz* [online]. 2010-04-14 [cit. 2014-11-02]. ISSN 1801-2655. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/biomasovy-popel-prvkove-slozeni-a-moznosti-jeho-vyuziti>
- [12] HANUS, Vlastimil. 2010. *Tavení popele z biomasy*. Brno. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 49 s. Vedoucí práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [13] ČESKO. Zákon č. 146/2007 Sb. o emisních limitech a dalších podmínkách provozování spalovacích stacionárních zdrojů znečišťování ovzduší. *Sbírka zákonů České republiky* [online]. 2007, částka 53, 1838-1892 s. Dostupné z: <http://aplikace.mvcr.cz/sbirka-zakonu/ViewFile.aspx?type=c&id=5144>
- [14] ČESKO. Vyhláška č. 415/2012 Sb. o přípustné úrovni znečišťování a jejím zjišťování a o provedení některých dalších ustanovení zákona o ochraně ovzduší. *Sbírka zákonů České republiky* [online]. 2012, 116 s. Dostupné z: [http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/AE682A6B5E42E986C1257BA60025D8B5/\\$file/V%20415-2012.pdf](http://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/d79c09c54250df0dc1256e8900296e32/AE682A6B5E42E986C1257BA60025D8B5/$file/V%20415-2012.pdf)
-

- [15] PAŘÍZEK, Tomáš. 2009. *Redukce emisí škodlivých látek u jednotek pro termické zpracování odpadů*. Brno. Disertační práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 136 s. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Běbar, CSc.
- [16] SKÁLA, Zdeněk. *Termokinetika spalování*. 1. vyd. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 1984, 116 s.
- [17] KOZUBKOVÁ, Milada. *Modelování proudění tekutin, FLUENT, CFX*. 1. vyd. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008, 153 s. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-Fluent.pdf>
- [18] KOIŠ, Jiří. 2014. *Výpočtový model kotle KWH*. Brno. Diplomová práce. VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 86 s. Vedoucí práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.
- [19] YSTRÖM, Jacob. Fast solvers for complex problems. *Machine Design* [online]. 2007-02-08 [cit. 2015-04-04]. ISSN 0024-9114. Dostupné z: <http://machinedesign.com/archive/fast-solvers-complex-problems>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Popis
4D SYSTÉM	Katalytická filtrace pomocí keramických trubic
ADIOX	Technologie pro odstraňování dioxinů pomocí adsorpce dioxinů na plasty
BAT	Nejlepší dostupná technologie (Best Available Techniques)
C_xH_y	Obecný vzorec uhlovodíků
DeDiox	Technologie pro odstraňování dioxinů
DeNO_x	Technologie pro odstraňování dioxinů NO _x
DOF	Stupně volnosti (Degrees Of Freedom)
ePTFE	Expandovaný polytetrafluoretylen
FEM	Metoda konečných prvků (Finite Element Method)
MKP	Metoda konečných prvků
PCDD/F	Polychlorované dibenzo-dioxiny a polychlorované dibenzofurany (zkráceně dioxiny)
RAM	Operační paměť (Random Access Memory)
REMEDIA D/F™	Metoda katalytické filtrace na bázi ePTFE za účelem odstranění PCDD/F
SCR	Selektivní katalytická redukce
SNCR	Selektivní nekatalytická redukce

Symbol	Jednotka	Popis
Q_C	[J]	Teplo uvolněné při dokonalém spalování uhlíku na oxid uhličitý
Q_{C1}	[J]	Teplo uvolněné při dokonalém spalování uhlíku na oxid uhelnatý
Q_{C2}	[J]	Teplo uvolněné při dokonalém spalování oxidu uhelnatého na oxid uhličitý
Q_H	[J]	Teplo uvolněné při dokonalém spalování vodíku na vodní páru
Q_S	[J]	Teplo uvolněné při dokonalém spalování síry na oxid siřičitý

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Konstrukce pevného roštu a roštu se zvlněnými roštnicemi	18
Obr. 2	Konstrukce stupňovitého roštu	18
Obr. 3	Izometrické zobrazení spalovací komory	23
Obr. 4	Řez spalovací komorou	23
Obr. 5	Simulační model spalovací komory	24
Obr. 6	Tvary prvků výpočtové sítě	25
Obr. 7	Vnitřní hranice sítě výpočetní oblasti	26
Obr. 8	Vnější hranice sítě výpočetní oblasti	26
Obr. 9	Vnitřní hranice sítě výpočetní oblasti	27
Obr. 10	Závislost používané operační paměti na počtu stupňů volnosti (DOF)	28
Obr. 11	Rozložení tlaku ve spalovací komoře na horizontálních plochách	29
Obr. 12	Detail rozložení tlaku ve spalovací komoře na horizontálních plochách	29
Obr. 13	Detail rozložení tlaku u vstupu sekundárního vzduchu v horizontálních plochách	30
Obr. 14	Detail rozložení tlaku u vstupu sekundárního vzduchu v horizontálních plochách	30
Obr. 15	Vektorové pole rychlosti proudění v rovině y-z procházející středem komory	31
Obr. 16	Vektorové pole rychlosti proudění v rovině x-z procházející rovinným roštem	32
Obr. 17	Vektorové pole rychlosti proudění v rovinách x-z	32
Obr. 18	Vektorové pole rychlosti proudění v rovinách x-z	33
Obr. 19	Proudnice primárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti proudění	33
Obr. 20	Proudnice primárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti proudění	34
Obr. 21	Proudnice primárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti proudění	34
Obr. 22	Proudnice sekundárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti proudění	35
Obr. 23	Proudnice spalovacího vzduchu se škálou odpovídající rychlosti proudění	35
Obr. 24	Rozložení tlaku v prostoru mezi vstupem sekundárního vzduchu a protější stěnou	37
Obr. 25	Rozložení tlaku na stěně spalovací komory	37
Obr. 26	Rozložení tlaku ve spalovací komoře	38
Obr. 27	Rozložení rychlosti vstupujícího sekundárního spalovacího vzduchu	39
Obr. 28	Vektorové pole rychlosti v rovině xy vedené středem komory	39
Obr. 29	Vektorové pole rychlosti v rovině yz vedené osou vstupu primárního vzduchu	40

Obr. 30	Vektorové pole rychlosti v rovině y-z vedené osou vstupu sekundárního vzduchu	40
Obr. 31	Vektorové pole rychlosti v rovině y-z v blízkosti výstupního otvoru	41
Obr. 32	Proudnice primárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti	41
Obr. 33	Proudnice sekundárního vzduchu se škálou odpovídající rychlosti	42
Obr. 34	Proudnice spalovacího vzduchu se škálou odpovídající rychlosti	42
Obr. 35	Schéma konstrukční úpravy a)	44
Obr. 36	Schéma konstrukční úpravy b)	45
