

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
Fakulta strojního inženýrství
Ústav procesního a ekologického inženýrství

Ing. Marek Šarlej

**MODELOVÁNÍ JAKO ÚČINNÝ NÁSTROJ
V PRŮMYSLOVÉ PRAXI A EKONOMICKÉ ASPEKTY**

MODELLING AS EFFICIENT TOOL
IN INDUSTRIAL PRACTICE AND ECONOMIC ASPECTS

Zkrácená verze Ph.D. Thesis

Obor: Konstrukční a procesní inženýrství
Školitel: prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Oponenti: prof. Dr.-Habil. Ing. Jiří Klemeš, D.Sc., Dr.h.c.
RNDr. Petr Žaloudík, CSc.
Datum obhajoby: 24. 9. 2012

Klíčová slova

modelování, CFD, odpady, biomasa, finanční model, peněžní tok

Key words

modeling, CFD, waste, biomass, financial model, cash-flow

Místo uložení dizertační práce

Ústav procesního a ekologického inženýrství, FSI, VUT v Brně

Tato práce vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě strojního inženýrství. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

© Marek Šarlej, 2012

ISBN 978-80-214-4630-4

ISSN 1213-4198

OBSAH

1	ÚVOD.....	5
2	TECHNOLOGICKÁ JEDNOTKA A ZAŘÍZENÍ	5
2.1	TECHNOLOGICKÁ JEDNOTKA.....	5
2.2	TECHNOLOGICKÉ ZAŘÍZENÍ.....	5
3	MODELOVÁNÍ A JEHO VÝZNAM.....	6
4	ÚROVNĚ VYUŽITÍ MODELOVÁNÍ.....	6
4.1	POPTÁVKA A NABÍDKA	6
4.2	SIMULAČNÍ VÝPOČTY TECHNOLOGICKÝCH JEDNOTEK	6
4.2.1	<i>Specifikace zadání</i>	7
4.2.2	<i>Vlastní simulační výpočet</i>	7
	<i>Detailní výpočty</i>	7
4.3	VÝPOČTY ZAŘÍZENÍ.....	7
4.4	VYUŽITÍ VÝPOČTOVÉ DYNAMIKY TEKUTIN – CFD.....	8
4.4.1	<i>Návrh nových zařízení</i>	8
4.4.2	<i>Troubleshooting</i>	8
5	MODELOVÁNÍ S VYUŽITÍM CFD.....	9
5.1	KONVENČNÍ A TYPOVÁ ZAŘÍZENÍ.....	9
5.2	ATYPICKÁ ZAŘÍZENÍ A PROTOTYPY	9
5.3	EKONOMICKÉ ASPEKTY VYUŽITÍ CFD.....	9
5.3.1	<i>Přidaná hodnota</i>	10
5.3.2	<i>CFD jako nástroj obchodní a marketingové strategie</i>	10
5.3.3	<i>Význam CFD v mezinárodních výzkumných projektech</i>	10
6	PŘÍPADOVÉ STUDIE	11
6.1	VYUŽITÍ MODELOVÁNÍ NA BÁZI CFD U NÍZKOEMISNÍCH HOŘÁKŮ	11
6.2	OVĚŘENÍ MODELOVÁNÍ CFD	12
6.3	EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ ÚSPOR PŘI ŘEŠENÍ PROBLÉMŮ SE ZANÁŠENÍM TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU	13
6.4	ZAŘÍZENÍ PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ MALÝCH KAPACIT.....	17
6.5	TECHNOLOGICKÁ JEDNOTKA PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ DŘEVNÍHO ODPADU	18
7	ZÁVĚR.....	19
	LITERATURA	21
	ŽIVOTOPIS.....	22
	PŘEHLED VLASTNÍ LITERATURY	23
	ABSTRACT	26

1 ÚVOD

Tato dizertační práce se zabývá problematikou modelování jako účinného nástroje použitelného v průmyslové praxi v oblasti procesního průmyslu a energetiky a ochrany životního prostředí. Je zde představeno jak modelování části technické, tak i ekonomické a zároveň jejich propojení.

Podniky v případě potřeby nehodnotí pouze technické řešení s ohledem na investiční náklady a návratnost investic, ale hledají optimalizované řešení po stránce technické i ekonomické s důrazem na provozní, energetické a další náklady.

Dizertační práce se zaměřuje jak na modelování jednotlivých zařízení, tak i technologických jednotek, a to v různých úrovních komplexnosti.

Jsou zde uvedeny konkrétní případové studie využívající různé úrovně modelování.

2 TECHNOLOGICKÁ JEDNOTKA A ZAŘÍZENÍ

Úroveň modelování mimo jiné závisí na tom, zda se jedná o technologickou jednotku anebo o jednotlivé zařízení. V této kapitole je uvedeno základní porovnání obou koncepcí.

2.1 TECHNOLOGICKÁ JEDNOTKA

Technologická jednotka je funkční celek, který se skládá z jednotlivých, vhodně sestavených zařízení (aparátů). V oblasti ochrany životního prostředí a energetiky může pro ilustraci posloužit příklad technologické jednotky pro energetické využití odpadů [1].

U modelování se po technické stránce jedná nejčastěji o technologickou bilanci tj. materiálovou a energetickou bilanci jednotky jako celku na základě zadávacích údajů.

Výstupem modelování technologické jednotky bývají podklady pro návrh technologických schémat včetně technologických údajů o jednotlivých proudech a základní parametry technologických zařízení.

2.2 TECHNOLOGICKÉ ZAŘÍZENÍ

Technologické zařízení tvoří součást technologické jednotky, nicméně z pohledu modelování je na něj nahlíženo jako na solitér ohraničený vstupními a výstupními proudy. Úroveň modelování záleží na aktuální potřebě. Může se jednat o základní

výpočet rozměrů zařízení, tepelných a tlakových ztrát, tepelné roztažnosti. Jako výpočtové nástroje se používají tabulkové procesory nebo simulační výpočtové systémy. Může se ale jednat i o pokročilé modelování proudění, optimalizace tvaru zařízení, chemicko-fyzikálních procesů anebo o pevnostní výpočty, obojí s využitím komplexních softwarových systémů na bázi metody konečných objemů [2] resp. konečných prvků.

3 MODELOVÁNÍ A JEHO VÝZNAM

Cílem modelování technologických jednotek a jednotlivých zařízení je napodobit jejich reálný provoz jak po stránce technické, tak i po stránce ekonomické. Modelování má potom značný význam v oblasti návrhových výpočtů i kontrolních výpočtů. Podrobnosti jsou uvedeny v dalších kapitolách.

U modelování technologických jednotek a zařízení v oblasti ekologie a energetiky a přípravy průmyslového realizačního projektu se setkáme s různými druhy modelování a různými úrovněmi.

4 ÚROVNĚ VYUŽITÍ MODELOVÁNÍ

Tato kapitola představuje různé úrovně využití modelování v rámci realizace investičních záměrů a to od prvopočáteční fáze poptávky až po zlepšování parametrů jednotlivých zařízení.

4.1 POPTÁVKA A NABÍDKA

V průmyslové praxi je úroveň zpracování nabídky a modelování přizpůsobena individuálně. Proto je téměř nemožné definovat nějaká obecná pravidla. Nabídka se především přizpůsobuje zákazníkovi; závažnosti obchodního případu, která bývá patrná z úrovně poptávky; požadovanému rozsahu předmětu nabídky; množství času na přípravu nabídky; atd.

4.2 SIMULAČNÍ VÝPOČTY TECHNOLOGICKÝCH JEDNOTEK

V této kapitole je představena aplikace různých úrovní simulačních výpočtů s ohledem na fázi realizace projektů.

4.2.1 Specifikace zadání

V praxi se často setkáváme se skutečností, že zadání není specifikováno dostatečně, často jsou některé vstupní údaje nejasné popř. chybí úplně. Nezbyvá pak než chybějící údaje odborně odhadnout a míru rizika s tím spojenou poté zohlednit v ceně. Simulační výpočty zde pak hrají klíčovou roli, neboť je pomocí nich možné tato rizika snížit.

4.2.2 Vlastní simulační výpočet

Jednoduché výpočty

Na základě zadání bývá často proveden zjednodušený výpočet založený na základě využití základních fyzikálně-chemických vztahů. Tento výpočet dává základní obrysy návrhu technického řešení. Pro účely tohoto výpočtu stačí kalkulačka popř. tabulkový procesor. Z tohoto výpočtu vyplývají orientační údaje o vstupních a výstupních proudech, rozsahu technologické jednotky a tím i o předpokládané výši investice. Výsledky výpočtu bývají použity pro další zpřesňující jednání se zákazníkem, v případě jeho zájmu pro vypracování orientační nabídky na dodávku technologické jednotky. Navíc díky jejich jednoduchosti a transparentnosti také pro zpětnou kontrolu detailních výpočtů kompletní technologické jednotky a jednotlivých zařízení, zda jsou výsledky zjednodušených a detailních výpočtů řádově v souladu.

Detailní výpočty

Pro účely vypracování konkrétní nabídky, projektové dokumentace a někdy i studie proveditelnosti již bývají využívány detailnější simulační výpočty technologických jednotek. Pomocí těchto simulačních výpočtů jsou získány podrobnější údaje o vstupních a výstupních proudech, které jsou potřebné pro detailní návrh technologie a jednotlivých zařízení.

4.3 VÝPOČTY ZAŘÍZENÍ

Výpočty zařízení jsou založeny na výsledcích simulačních výpočtů technologické jednotky, jejíž jsou součástí. Podobně jako v předchozí kapitole je možné výpočty rozdělit na jednoduché a detailní. Cílem obou úrovní těchto výpočtů je návrh konkrétních konstrukčních a technologických parametrů zařízení.

Zjednodušené výpočty se v praxi často používají jako podklad pro vypracování nabídky od subdodavatelů jednotlivých zařízení. Subdodavatelé na základě těchto vstupních dat mohou díky své odbornosti nabídnout konkrétní zařízení, které splňuje

technologické požadavky. Tím pro generálního dodavatele odpadá nutnost provádět detailní výpočty, což šetří čas a tím i náklady na práci projektanta. Subdodavatelé buď vyberou svoje vhodné typové zařízení anebo na základě vstupních údajů provedou detailní výpočty a navrhnu zařízení „na míru“ s tím, že tyto projekční činnosti zohlední ve své nabídkové ceně.

4.4 VYUŽITÍ VÝPOČTOVÉ DYNAMIKY TEKUTIN – CFD

Modelování na bázi CFD se dá považovat za účinný nástroj sloužící jak pro lepší pochopení základních jevů, tak i pro návrh nebo kontrolu zařízení zahrnující komplexní geometrii. V případě zařízení pro ekologii a energetiku se CFD často používá pro získání představy o proudění (rychlostní profily), o podmínkách výměny tepla (teplotní pole), velikosti tlakových ztrát, ale i pro složitější úkoly jako např. simulace spalování včetně analýzy vybraných emisí ve vznikajících spalinách (např. NO_x). Výsledky mohou poskytnout důležité informace jak pro návrh nových zařízení, tak i pro řešení stávajících problémů. Výsledky mohou sloužit jako dobrý odrazový můstek pro následnou optimalizaci sledovaného zařízení. V případě predikcí složitějších fyzikálně-chemických jevů, jako např. spalování je ovšem nutné brát výsledky simulací s rezervou, protože v této oblasti ještě nejsou výpočtové metody příliš spolehlivé. Z toho důvodu je nezbytné znát jejich výhody a nevýhody [3].

4.4.1 Návrh nových zařízení

V případě návrhu nových zařízení umožňuje CFD návrháři, konstruktérovi pochopit a předem částečně prozkoumat „chování“ nově navrhovaného zařízení. Pomocí tzv. virtuálního prototypu může již v rané fázi návrhu odhalit slabiny (např. při návrhu tepelných výměníků odhalit tzv. „mrtvé zóny“).

4.4.2 Troubleshooting

V případě řešení problémů stávajících průmyslových zařízení se nabízí využití CFD především v těch případech, kdy do daného zařízení není umožněn přístup a možnost identifikace problému za provozu. V každém případě je ovšem nutné zvážit rozsah a závažnost problému a podle toho se poté rozhodnout buď pro „rychlý“ odborný odhad zkušeného technika anebo pro časově náročnější modelování.

4.4.3 Zlepšení parametrů zařízení

Třetí oblastí je zlepšení parametrů zařízení. Zlepšení parametrů se týká jak návrhu nového zařízení, tak i stávajících zařízení provozovaných v průmyslové praxi.

Účinné využití modelování na bázi CFD je možné skloubením simulačních výpočtů a praktických zkušeností odborníků z reálných průmyslových provozů, přičemž se nikdy nesmí zapomenout na určující ekonomické aspekty.

5 MODELOVÁNÍ S VYUŽITÍM CFD

Následující kapitola se věnuje otázkám účinného nasazení CFD. Je efektivnější nasazovat CFD v případě konvenčních a typových zařízení anebo spíše v případě atypických zařízení a prototypů?

5.1 KONVENČNÍ A TYPOVÁ ZAŘÍZENÍ

Nejprve se zaměříme na oblast konvenčních a typových zařízení. V případě realizace projektu na výstavbu, popř. rekonstrukci technologické jednotky sestávající z konvenčních zařízení se dodavatelská činnost často řeší formou subdodávek typových zařízení. Toto představuje osvědčený způsob, jak se vyhnout riziku spojenému s nasazením nových atypických zařízení, která se nakonec mohou ukázat jako zcela nevyhovující anebo neúčinná. Využití modelování na bázi CFD se z výše uvedených důvodů stává neefektivním.

5.2 ATYPICKÁ ZAŘÍZENÍ A PROTOTYPY

Na druhou stranu se ovšem využití modelování na bázi CFD přímo nabízí pro návrh atypických anebo zcela nových aparátů pro specifické aplikace. Absence provozních dat a zkušeností, které by mohly přispět ke kvalitnímu návrhu přímo nahrává nasazení modelování s využitím CFD.

5.3 EKONOMICKÉ ASPEKTY VYUŽITÍ CFD

Z pohledu firmy hraje zásadní roli při rozhodování o nasazení modelování na bázi CFD ekonomická stránka. Klíčovou otázkou je, nakolik najde aplikace tohoto výpočtového nástroje efektivní využití při nabídkové i samotné projekční činnosti.

5.3.1 Přidaná hodnota

V rámci nabídkové činnosti je třeba zvážit, zda přidaná hodnota v podobě simulace CFD podpoří rozhodnutí investora o realizaci projektu a tudíž lze akceptovat vynaložené náklady na výpočtové činnosti (za subdodávku specializované výpočtářské firmy anebo vlastní náklady spojené s investicemi za výpočetní softwarový systém, výkonný hardware a osobními náklady na výpočtáře). Při nasazení CFD je také nezbytné brát v úvahu větší časovou náročnost v porovnání s běžnými výpočty.

5.3.2 CFD jako nástroj obchodní a marketingové strategie

Se vzrůstajícím povědomím o možnostech CFD mezi manažery a techniky průmyslových podniků se jeho nasazení v rámci obchodně-technických nabídek stále častěji stává přidanou hodnotou pro zákazníka. Zákazník má tak již v rámci nabídky možnost díky přehledné vizualizaci výsledků získat představu o funkci a účinnosti nabízené technologie popř. zařízení. Tímto způsobem je též možné zákazníkovi předvést, že nabízená technologie je na základě jeho požadavků vhodná, např. prostřednictvím grafického znázornění několika alternativních řešení, aby bylo z porovnání jasné, že nabízené zařízení je pro daný účel optimální. Znovu je ale nutné na základě jednoduché ekonomické analýzy rozhodnout, zda má cenu obětovat čas a vynaložit přidané náklady.

5.3.3 Význam CFD v mezinárodních výzkumných projektech

Využití modelování na bázi CFD má zásadní význam i pro řešení mezinárodních výzkumných projektů v oblasti energetiky a zařízení pro ekologii. Cílem těchto projektů bývá zlepšení existujícího stavu s ohledem buď na zvýšení účinnosti a celkovou optimalizaci stávajících procesů a jednotek, anebo na výzkum a vývoj nových, vysoce účinných jednotek a procesů. Jedná se o oblasti, kde nasazení CFD může sehrát důležitou roli a kde lze maximálně využít jeho možností.

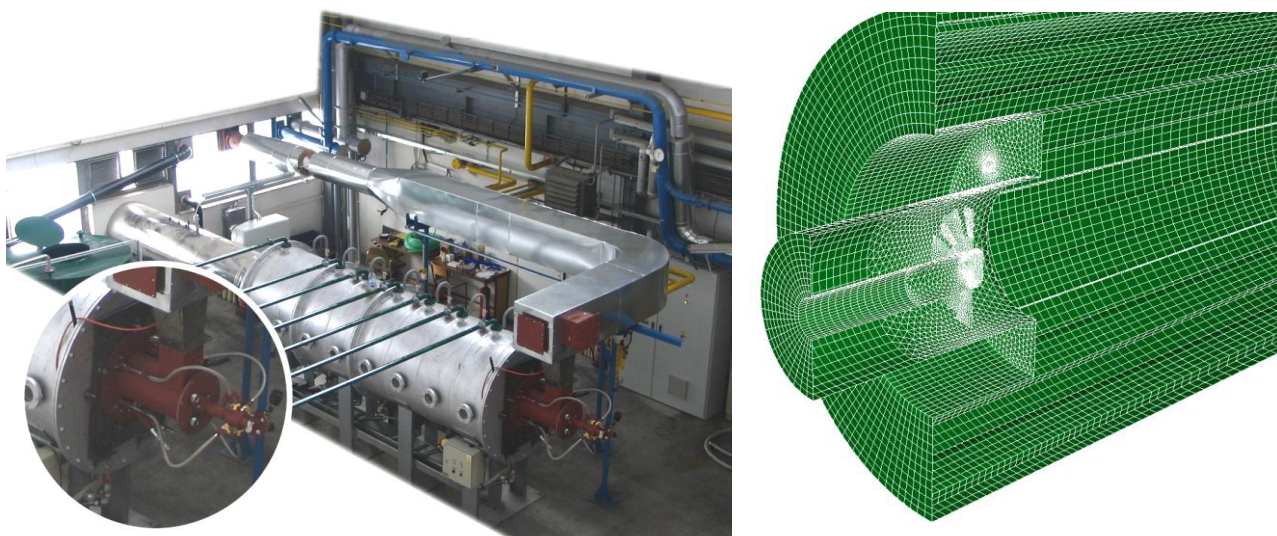
6 PŘÍPADOVÉ STUDIE

V této kapitole budou představeny případové studie týkající se různých úrovní modelování.

6.1 VYUŽITÍ MODELOVÁNÍ NA BÁZI CFD U NÍZKOEMISNÍCH HOŘÁKŮ

Návrh nových hořáků bývá často založen na dlouhodobých zkušenostech konstruktérů. Navíc bývají nové hořáky před nasazením do průmyslové praxe testovány ve zkušebnách. Nicméně tento přístup je omezen jak ekonomickými faktory (nákladná výroba prototypu a samotných zkoušek), tak i technickými (možnosti zkušebny). Z toho důvodu se hledají nové alternativy pro částečnou popř. kompletní náhradu fyzických zkoušek pomocí moderních výpočetních nástrojů.

Současné výpočetní metody pro predikce toku tekutin zahrnující chemické reakce a tepelné pochody umožňují komplexní simulace hořáků. Na druhou stranu nemusí být tyto výpočetní metody stoprocentně spolehlivé a je potřeba si být vědom jejich silných a slabých stránek. Kromě toho je nutné ověřovat přesnost predikcí pomocí zkušebních měření.



Obr. 1 – Zkušební hořák instalovaný v experimentální komoře
(a) zkušebna hořáků (b) geometrický model včetně výpočetní sítě

Tato případová studie se věnuje matematickému modelování moderního nízkoemisního hořáku [4]. Hořák byl navržen jako dvoustupňový s potlačenou tvorbou NO_x (viz obr. 1). Díky jeho sofistikované konstrukci je možné jednoduše modifikovat nastavení palivových trysek za účelem optimálního provozu ve smyslu

minimálních emisí NO_x . Z jiného pohledu tento hořák představuje ideální nástroj, který může být použit pro ověření řady výpočtových modelů různých provozních a konstrukčních parametrů.

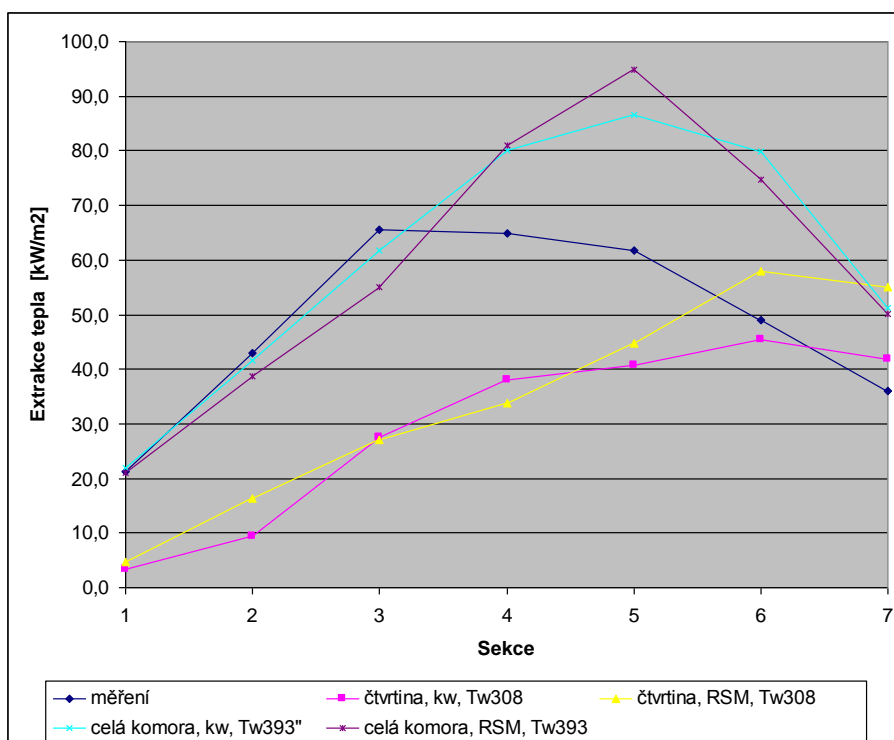
Tato případová studie demonstruje jednu z možností využití CFD ve smyslu nalezení optimálního uspořádání sekundárních palivových trysek u experimentálního hořáku na zemní plyn. Sada alternativních uspořádání byla analyzována s ohledem na tvorbu emisí NO_x . Na základě analýzy výsledků výpočtů byla nalezena alternativa odpovídající minimální tvorbě NO_x . Tato případová studie je ovšem pouze prvním krokem komplexní optimalizace experimentálního hořáku.

Další kroky tedy směřovaly k ověření spolehlivosti CFD predikcí. Konkrétně se jednalo o provedení měření extrakce tepla po délce spalovací komory a následné porovnání vypočtených a naměřených hodnot a tím o ověření spolehlivosti CFD predikcí. Měření bylo možné provádět díky speciálnímu konstrukčnímu řešení spalovací komory, jejíž plášť je rozdělen do několika segmentů s odděleným vodním chlazením. O tomto je pojednáno v následující případové studii.

6.2 OVĚŘENÍ MODELOVÁNÍ CFD

V rámci této případové studie byla opět jako v předchozím případě využita nová zkušebna hořáků (vybudovaná na ÚPEI v průmyslovém měřítku) pro provedení měření odvodu tepla po délce spalovací komory. Měření je možné provádět díky speciálnímu konstrukčnímu řešení spalovací komory, jejíž plášť je rozdělen do několika segmentů s odděleným vodním chlazením. Toto dává možnost porovnat naměřená a vypočtená data lokálního odvodu tepla spalovací komory a tím tak ověřit spolehlivost CFD predikcí.

Tento příspěvek se věnuje dalším krokům v rámci komplexního úkolu optimalizace geometrie hořáku s potlačenou tvorbou NO_x . Předchozí kapitola se zabývala nalezením vhodné alternativy geometrického uspořádání sekundárních palivových trysek. Je ale důležité podotknout, že se jednalo pouze o výsledky matematického modelování, které nebyly experimentálně ověřeny. Další kroky tedy směřovaly k ověření spolehlivosti CFD predikcí. Konkrétně se jednalo o provedení měření odvodu tepla po délce spalovací komory. Porovnání vypočtených a naměřených hodnot extrakce tepla je možné díky speciálnímu konstrukčnímu řešení spalovací komory.



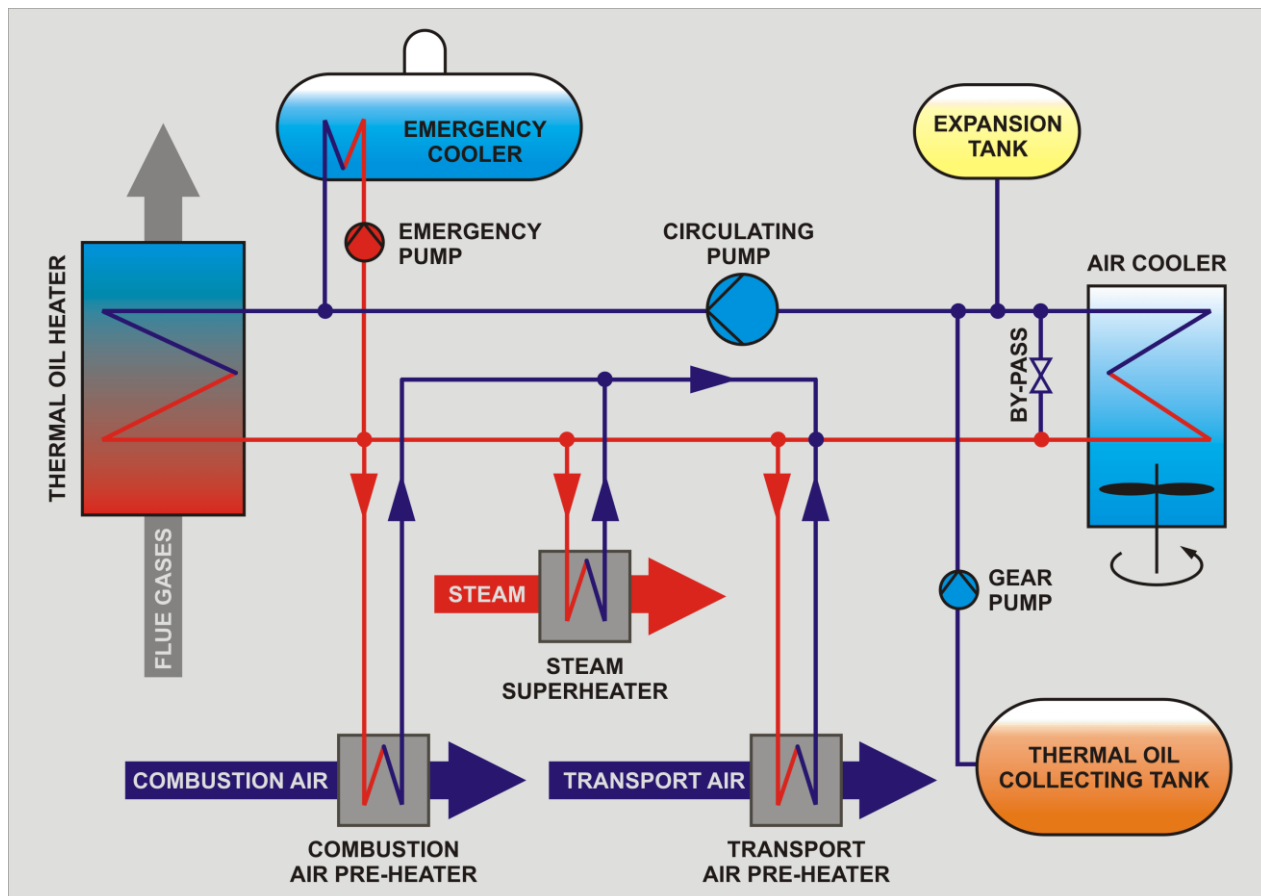
Obr. 2 - Porovnání naměřených a vypočtených údajů extrakce tepla

Z výše uvedené analýzy vyplývá, že nedochází k uspokojivé shodě mezi naměřenými a vypočtenými daty (viz obr. 2). Lepšího přiblížení k naměřeným hodnotám dosahujeme při použití výpočtového modelu celé komory. Bohužel u obou variant nedošlo k uspokojivému zachycení trendu extrakce tepla podél délky spalovací komory. Z tohoto pohledu vyplývá, že představené výpočtové modely nejsou pro účely spolehlivé predikce vyhovující. Pro dosažení lepší shody musíme provést zpětnou analýzu modelu, identifikovat vlivy, které mohou být zásadní pro získání spolehlivých výsledků. Mezi vlivy může patřit správná volba modelu spalování. Dokonce může i způsob iniciace spalování mít vliv na výsledky výpočtu a je tedy nutné i tento předpoklad na představeném modelu dokázat nebo vyvrátit [5]. Mezi další faktory může také patřit, jak je namodelován přívod spalovacího vzduchu do prostoru, kde dochází k hoření, neboť i charakteristika proudění spalovacího vzduchu má významný vliv na proces spalování.

6.3 EKONOMICKÉ VYHODNOCENÍ ÚSPOR PŘI ŘEŠENÍ PROBLÉMU SE ZANÁŠENÍM TEPELNÉHO VÝMĚNÍKU

Dalším příkladem aplikace CFD je řešení problému zanášení rekuperačního výměníku termoolej/spaliny.

V rámci technologie spalovny průmyslových kalů z čistírny odpadních vod je zařazen systém utilizace tepla spalin (viz obr. 3). Jako teponosné médium se využívá termoolej. Přenos tepla z proudu spalin do termooleje probíhá v hlavním výměníku. Hlavní výměník je rekuperační s křížovým tokem. Skládá se ze dvou identických modulů registrů z hladkých trubek (obr. 4a).



- Thermal oil heaterTermoolejový výměník tepla (hlavní výměník)
- Emergency coolerNouzový chladič termooleje
- Combustion air pre-heaterTepelný výměník pro přehřev spalovacího vzduchu
- Steam superheaterPřehřívák páry
- Transport air pre-heaterTepelný výměník pro přehřev vzduchu pro pseudopravu
- Thermal oil collecting tankZásobní nádrž termooleje
- Air coolerVzduchový chladič
- Expansion tankExpanzní nádoba

Obr. 3 - Zjednodušené technologické schéma systému utilizace tepla spalin

Při provozování dochází ke značnému zanášení popílkem ze spalování kalů, a to především spodního registru. Popílek ulpívá na trubkách společně s nežádoucím produktem selektivní nekatalytické redukce oxidů dusíku, síranem amonným. Vzniká tak křehká krusta, která značným způsobem zhoršuje přenos tepla (viz obr. 4b). To představuje zásadní problém, neboť výměník tvoří jádro systému

utilizace tepla a nedostatečný výkon má negativní vliv na funkci celé technologie (nedostatečný přehřev spalovacího vzduchu pro pecní hořáky, nedostatečné přehřátí atomizační páry pro hořáky na kapalné palivo). Díky tomuto jevu nedochází ke snížení teploty spalin na požadovanou teplotu na vstupu do systému čištění spalin, a proto je nutné technologii odstavit a registry zbavit nánosů.



a) Instalace



b) Spodní registr zanesený popílkem

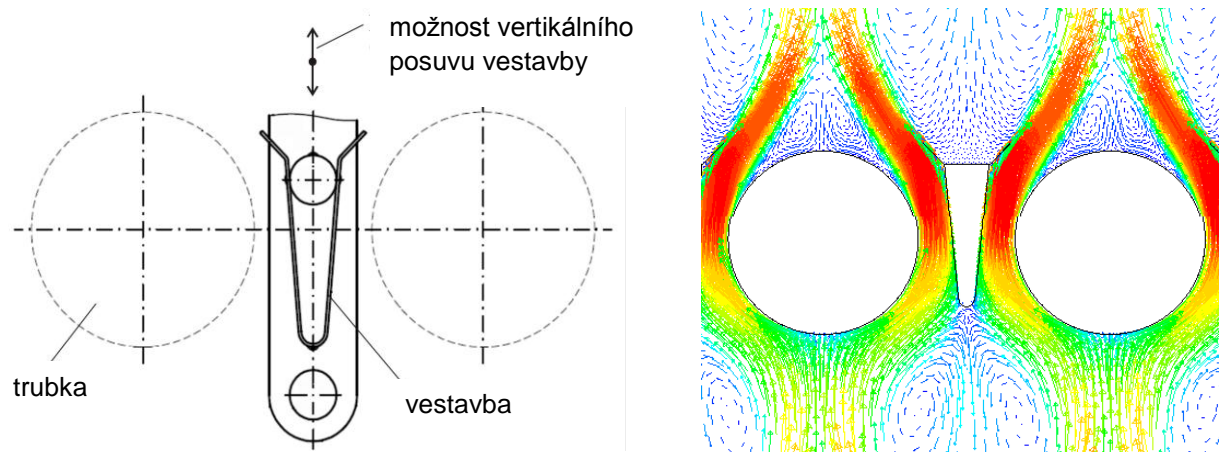
Obr. 4 - Termoolejový výměník

Časté odstávky ovšem způsobují značné potíže. Především není možné spalovat kaly, přičemž jejich množství neustále přibývá a provozní kalové zásobníky mají omezenou kapacitu. Rovněž, jak bude patrné z následné analýzy, představuje každá odstávka značné finanční náklady. V neposlední řadě způsobují odstávky zkrácení životnosti zařízení, především vyzdívek, které jsou tak vystavovány častým tepelným změnám.

Z výše uvedeného důvodu bylo nutné navrhnout vhodná opatření, která by zabránila nebo alespoň zmírnila zanášení. Byla navržena tato dvě řešení:

- Instalace zvukového ofukovače teplosměnných ploch
- Instalace speciálně konstruované vestavby navržené na základě simulačních výpočtů s využitím CFD (viz obr. 5a).

S podporou CFD byla navržena speciální vestavba (viz obr. 5a) tak, aby ovlivňovala tok spalin s cílem zvýšit rychlost proudících spalin a minimalizovat tak zanášení teplosměnných ploch. Samotný konstrukční návrh se opíral o vizuální výsledky simulace rychlostních profilů (obr. 5b). Ocelová vestavba byla instalována vertikálně do prostoru mezi jednotlivé sloupce trubek (obr. 5a).



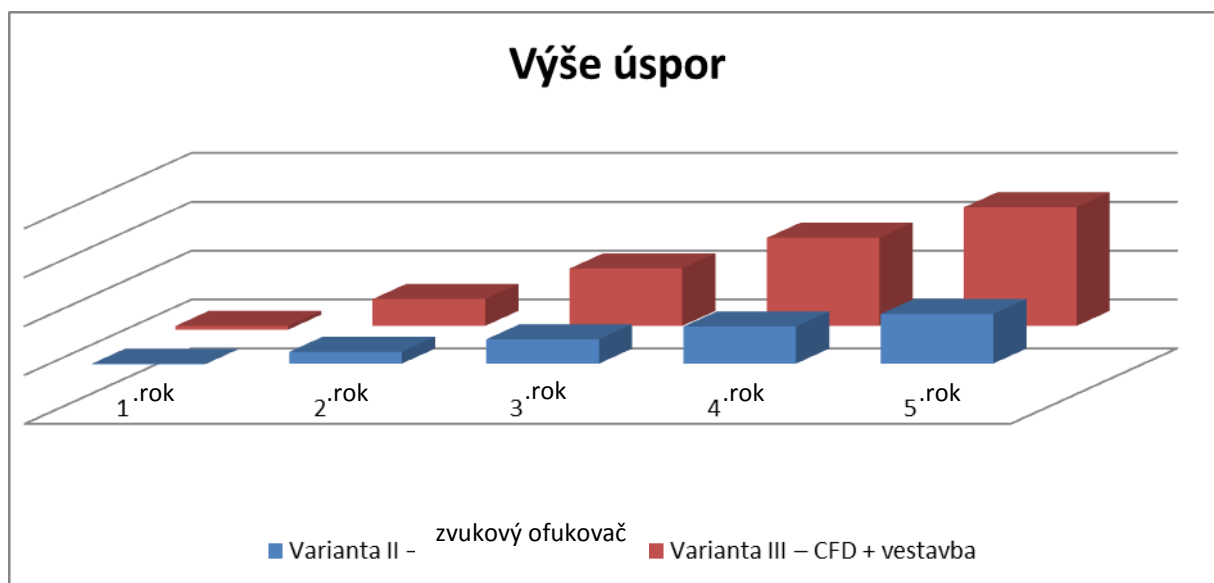
a) Konstrukční řešení vestavby

b) Rychlostní profil spalin proudících kolem vestavby mezi trubkami (vizualizace výsledků simulace CFD)

Obr.5 Speciálně konstruovaná vestavba

Vestavba byla vybavena speciálně tvarovanými „lopatkami“, které usměřňují tok spalin požadovaným způsobem. Tato vestavba je vertikálně posuvná, čímž je možné měnit rychlost spalin a řešit interakci zanášení a tlakových ztrát.

Následně bylo provedeno ekonomické vyhodnocení úspor pro obě řešení.



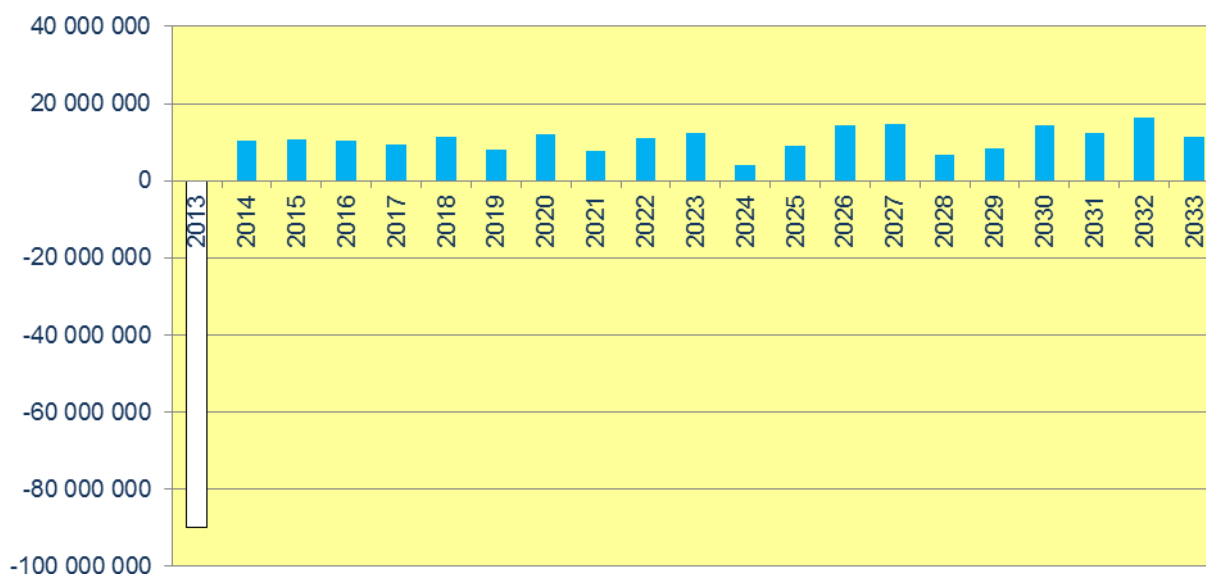
Obr. 6 - Grafické znázornění výše úspor oproti původnímu řešení

Z provedeného porovnání je patrné, že je ekonomicky nejvýhodnější varianta s nasazením vestavby s využitím CFD, i přes prvotní zvýšené investiční náklady, které ovšem nejsou nijak zvlášť významné (viz obr. 6). Roční náklady vyjádřené kumulovaně se v případě žádného opatření v pátém roce provozu přibližně rovnají investici za nový modul trubkového registru.

6.4 ZAŘÍZENÍ PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ MALÝCH KAPACIT

Tato kapitola se zabývá ekonomickým zhodnocením projektu výstavby zařízení pro energetické využití odpadů malých kapacit (dále jen „ZEVO“). Konkrétně se jedná o technologickou jednotku s roční zpracovatelskou kapacitou 10 kt odpadů. Vstupní údaje pro ekonomické zhodnocení vycházejí z předchozích technologických bilančních výpočtů [6].

Pro ekonomické zhodnocení výše uvedeného projektu byl použit finanční model, ze kterého jako hlavní výsledek vyplývá vnitřní výnosové procento, volný peněžní tok a čistá skutečná hodnota projektu v daném okamžiku. Základní údaje o modelu, který není běžně dostupný a byl rozvinut v této práci, jsou uvedeny v [7]. Jedná se o důležité parametry ovlivňující rozhodování každého investora popř. banky v případě úvěrování projektu. Finanční model je uveden v příloze 1 disertační práce.



Obr. 5 - Volný peněžní tok během hodnoceného období (v Kč)

Z výsledků finančního modelu vyplývá, že je projekt pro investory zajímavý a to především díky vnitřnímu výnosovému procentu 9,80 %, které je v současné době

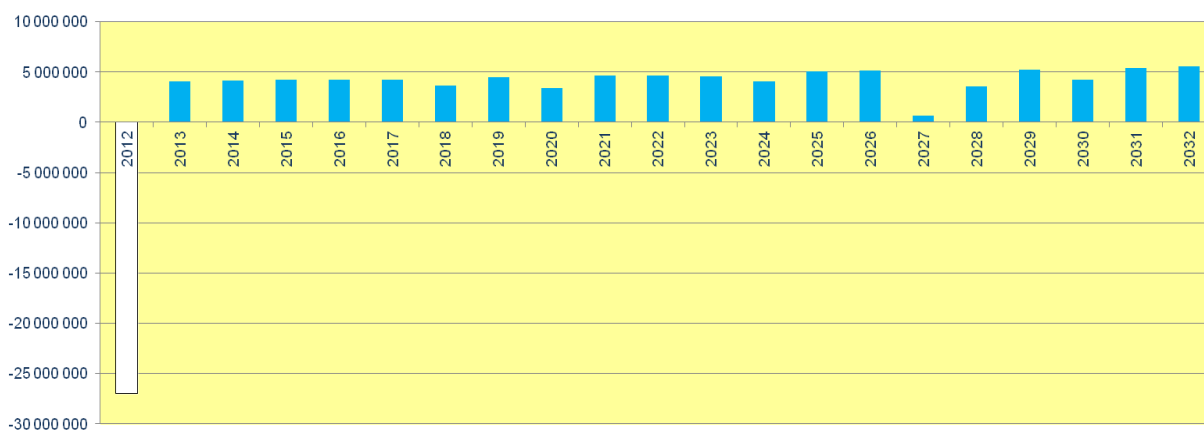
vyšší než úroky na spořicíh účtech v bankách. Projekt se stane ekonomicky ještě mnohem zajímavějším, v případě implementace investičních dotací na výstavbu ZEVO a případných bonusů za prodej elektrické energie.

6.5 TECHNOLOGICKÁ JEDNOTKA PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ DŘEVNÍHO ODPADU

Tato kapitola se zabývá finanční analýzou projektu výstavby technologické jednotky pro energetické využití dřevního odpadu. Technologická jednotka je primárně určena pro spalování dřevního odpadu (dřevní štěpka, odřezky, piliny, kůra), ovšem umožňuje spalování i jiných druhů biomasy (sláma, amarant, řepkové pokruty, slunečnicové šroty, kukuřičné zbytky apod.)

Technologická jednotka je vybavena náporovou turbínou, která prostřednictvím generátoru vyrábí elektrickou energii (svorkový elektrický výkon je 200 kW_{el}) a kondenzátorem, kde kondenzuje pára a předává svou energii pro výrobu teplé vody (tepelný výkon v teplé vodě je 2 400 kW a je využíván pro sušárny dřeva).

Pro ekonomické zhodnocení výše uvedeného projektu byl použit finanční model, ze kterého jako hlavní výsledek vyplývá vnitřní výnosové procento, volný peněžní tok a čistá skutečná hodnota projektu v daném okamžiku. Jedná se o základní důležité parametry ovlivňující rozhodování každého investora popř. banky v případě úvěrování projektu. Finanční model je uveden v příloze 2 disertační práce.



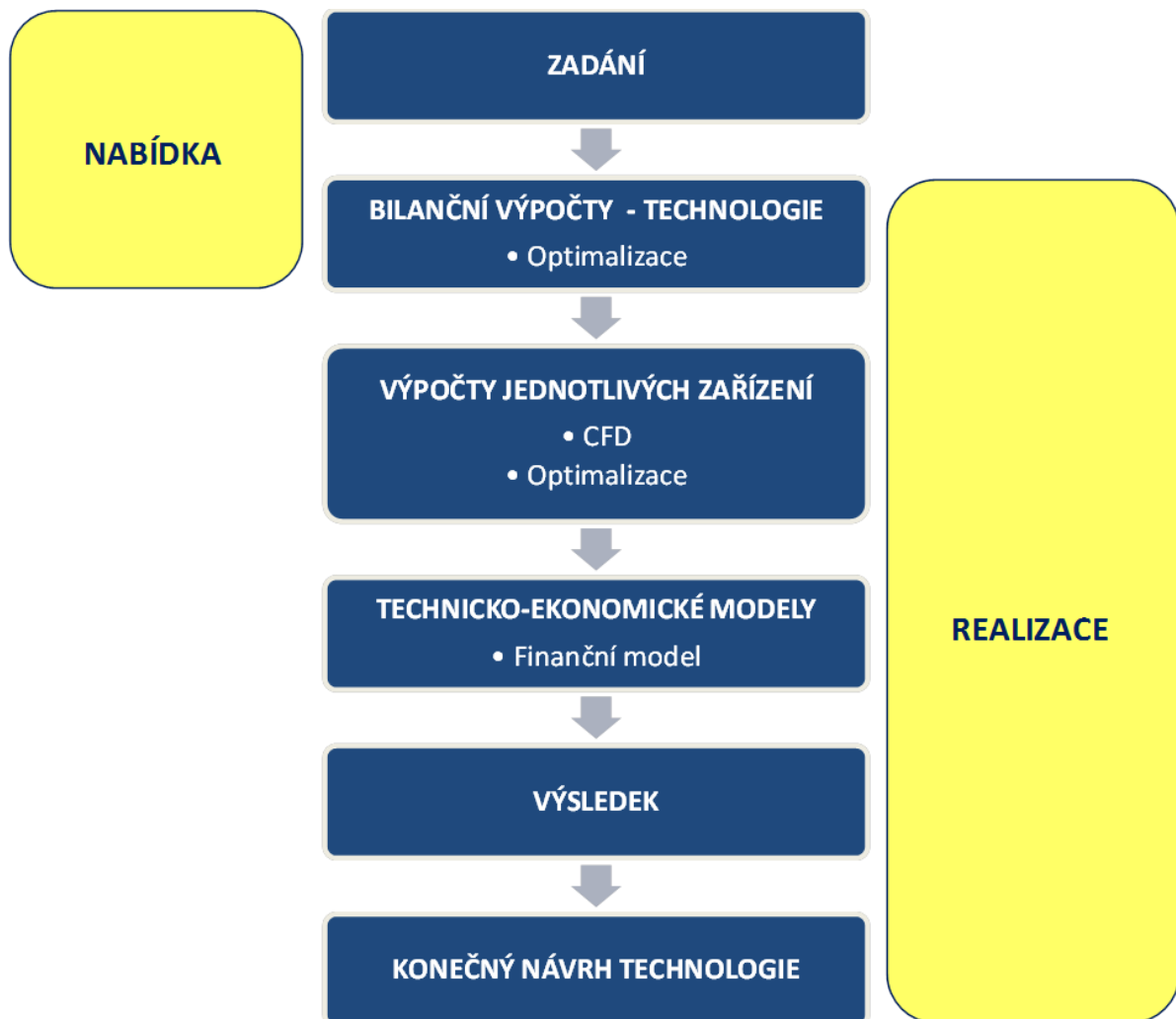
Obr. 6 - Volný peněžní tok během hodnoceného období (v Kč)

Z výsledků finančního modelu vyplývá, že lze projekt investorům doporučit k realizaci díky vysoké hodnotě vnitřního výnosového procenta. Projekt se stane ekonomicky ještě mnohem zajímavějším s využitím investičních dotací.

7 ZÁVĚR

Práce si kladla za cíl vyhodnotit a demonstrovat efektivní možnosti aplikace různých úrovní modelování s ohledem na inženýrskou praxi. Důraz byl kladen i na využití pokročilých výpočtových metod (CFD).

V inženýrské praxi je vždy třeba důkladně zvážit, jakou úroveň modelování je třeba zvolit s ohledem na mnoho faktorů, jako jsou časové možnosti, komplexnost úlohy, stupeň využití, pravděpodobnost realizace projektu. Tyto všechny faktory spojuje faktor ekonomický – jaké prostředky je vhodné a možné vynaložit na modelování.



Obr. 7 - Hierarchie návrhu technologických a energetických celků

U modelování využívající CFD se ukazuje, že nejdůležitější roli zde hrají právě ekonomické faktory. Vysoké investiční nároky spojené s pořízením software a

výkonného hardware dohromady s časovou náročností na provedení simulačních výpočtů představují hlavní „proti“. K těm je třeba ještě připočítat nedostatečnou spolehlivost výsledků v případě řešení složitějších fyzikálně-chemických jevů, např. spalování. Na druhou stranu, v případě nasazení modelování na bázi CFD v rámci optimálně sestaveného týmu zkušených odborníků (projektant – provozovatel – výpočtář) může tento přístup představovat přidanou hodnotu, kterou je možné komerčně zužitkovat, a to jak ve fázi návrhu nových moderních zařízení tak i při řešení problémů stávajících zařízení s ohledem na vylepšení jejich provozních a konstrukčních parametrů.

V rámci případových studií jsou představeny finanční modely pro ekonomické zhodnocení konkrétních projektů. Dílčí závěry jsou shrnuty v závěru každé příslušné kapitoly. Obecně však lze říci, že teprve až ekonomické zhodnocení dokáže přesvědčit zákazníka pro realizaci daného projektu.

LITERATURA

- [1] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (2010) *Reference document on best available techniques for the Waste Incineration (2006)*, cit. [2010-5-20]
- [2] Anderson, J.D. Jr., *Computational Fluid Dynamics; The Basics with Applications*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1995
- [3] Menter F.R. 'Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications', *AIAA Journal*, **32**, pp. 1598-1605, 1994
- [4] Šarlej, M.; Petr, P.; Hájek, J.; Stehlík, P., Computational support in experimental burner design optimisation, *Applied Thermal Engineering*, 2007, Volume 27, Issue 16, Pages 2727-2732
- [5] Frassoldati, S. Frigerio, E. Colombo, F. Inzoli, T. Faravelli, Determination of NO_x emissions from strong swirling confined flames with an integrated CFD-based procedure, *Chemical Engineering Science* 60 (2005) 2851 – 2869, 2004
- [6] Ucekaj, V. Analýza možností nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu. Brno, 2010. 153 s. *Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství*. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [7] Mareš, M., Ekonomické minimum procesních inženýrů, *prezentace k semináři Ekonomické minimum procesních inženýrů*, Brno, 2012

ŽIVOTOPIS

Ing. Marek Šarlej

Osobní údaje

Datum narození:

12. dubna 1981

Adresa:

K Rybníku 2, Brno, Česká republika

Zaměstnání

2005 – současnost

EVECO Brno, s.r.o.

Zařízení pro ekologii a energetiku

Manažer obchodu a marketingu

Vzdělání

2005 – 2012

Studium Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Technická 2, Brno

2000 - 2005

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Technická 2, Brno

1995 - 1999

Střední průmyslová škola strojnická

Obor managementu a služeb

Sokolská 1, Brno

2004 – Půlroční zahraniční stáž

Fachhochschule Augsburg

Fakultät für Maschinenbau

Umwelt- und Verfahrenstechnik

Krátkodobé zahraniční pobyty

Německo, Velká Británie, Řecko, Itálie,

Finsko, Dánsko v rámci evropských

výzkumných projektů

Znalosti a dovednosti

Jazykové znalosti

Angličtina – pokročilý

Němčina – středně pokročilý

Řidičský průkaz

Osobní automobil (skupina B)

Práce na PC, MS Office, MS Project, CorelDRAW, Adobe Photoshop, AutoCAD

PŘEHLED VLASTNÍ LITERATURY

- [1] Hájek, J.; Petr, P.; Šarlej, M.; Kermes, V.; Dvořák, R.; Stehlík, P.; Oral, J.; Šikula, J., Computational Support In Emissions Abatement, *In Proceedings of the First International Conference on Thermal Treatment and Resource Utilization of Wastes*. Beijing, China: 2005. s. 213-123
- [2] Petr, P.; Šarlej, M.; Hájek, J.; Piskovský, M.; Bébar, L.; Stehlík, P., CFD analýza dohořivací komory jednotek pro termické zpracování nebezpečných odpadů, *In 52. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2005*. Srní, Šumava: 2005. s. 219
- [3] Buchta, J.; Filip, M.; Bébar, L.; Stehlík, P.; Šarlej, M., New design in off-gas cleaning systems supported by experimental and computational approach, *In Chemical Engineering Transactions, Volume 7, 2005*, p. 375 – 380
- [4] Šarlej, M.; Petr, P.; Hájek, J.; Stehlík, P., Computational support in experimental burner design optimisation, *In CHISA2006-System Engineering - Summaries 4*, Praha: 2006, s. 867-871
- [5] Šarlej, M.; Petr, P.; Jegla, Z.; Stehlík, P., Heat transfer processes, *In CHISA-PRES 2006-System Engineering - Summaries 4*, Praha: 2006, s. 1037-1037
- [6] Hájek, J.; Šarlej, M.; Petr, P.; Piskovský, M.; Oral, J.; Stehlík, P., Application of CFD in technologies for hermal treatment of sludges, *Ústav procesního a ekologického inženýrství, 2006*
- [7] Petr, P.; Hájek, J.; Šarlej, M.; Piskovský, M.; Pařízek, T.; Bébar, L.; Stehlík, P., Computational analysis of secondary combustion chamber in hazardous waste incinerator, *In CHISA 2006 - Summaries 4 - System Engineering*. Praha: Process Enginnering Publisher, 2006. s. 1373-1373
- [8] Šarlej, M.; Petr, P.; Hájek, J.; Stehlík, P., Computational support in experimental burner design optimisation, *Applied Thermal Engineering, 2007, Volume 27, Issue 16, Pages 2727-2732*
- [9] Petr, P.; Bébar, L.; Hájek, J.; Šarlej, M.; Stehlík, P., Optimising design of secondary combustion chambers using CFD, *In 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*. Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2007. s. CD-ROM

- [10] Šarlej, M.; Hájek, J.; Stehlík, P., Simulace spalování a extrakce tepla ve spalovací komoře, In *CHISA 2007 – Sborník*, 1. 2007, s. 153-158
- [11] Hájek, J.; Vondál, J.; Šarlej, M.; Stehlík, P., Numerical and experimental analysis of turbulent swirling diffusion gas flames, In *Summaries 4 PRES 2008 and System Engineering*. 1. Krohova 75/2212, 160 00 Praha 6, Czech Republic: Process Engineering Publisher, Ing. Jan Novosad, 2008. s. 1587-1588. 2008
- [12] Šikula, J., Filip, M., Šarlej, M., Zkušenosti z provozu zařízení na termické zpracování kalů, In *Zborník konferencie Ochrana Ovzdušia 2008*, Štrbské pleso, Slovenská republika, 2008, s. 53-55
- [13] Kropáč, J.; Pavlas, M.; Šarlej, M.; Stehlík, P., Systémy čištění spalin při spalování biomasy, In *56. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2009*. 1. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2009. s. V046
- [14] Smejkal, Q.; Dvořák, R.; Stehlík, P.; Šarlej, M., Vývoj experimentální jednotky pro testování segmentového monolitového katalyzátoru pro potlačení vedlejších produktů selektivního spalování alternativních paliv, In *Aprochem 2009 - Sborník přednášek*, 2. díl. Milovy, 2009. s. 2269-2271
- [15] Smejkal, Q.; Šarlej, M.; Stehlík, P., New unit for clean energy production from contaminated biomass (1 to 3 MWt) - examples of process design, In *12th Conference of Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction. Chemical Engineering Transactions*. Milano: AIDIC, 2009. s. 1-6
- [16] Šikula, J., Šarlej, M., Nová technologická jednotka pro čistou energii z kontaminované biomasy (1 až 3 MW), In *Zborník konferencie Ochrana Ovzdušia 2009*, Štrbské pleso, Slovenská republika, 2009, s. 61-65
- [17] Šikula, J., Filip, M., Šarlej, M., Snížení emisí SO₂ pomocí hydrogenuhličitanu sodného na uhelných kotlích v Elektrárně Třebovice, In *Zborník konferencie Ochrana Ovzdušia 2010*, Štrbské pleso, Slovenská republika, 2010, s. 111-113
- [18] Ucekaj, V.; Šarlej, M.; Stehlík, P.; Oral, J.; Puchýř, R., Efficient and Environmentally Friendly Energy Systems for Microregions, In *Clean*

Technologies and Environmental Policy, 2010, Volume 12, Number 6, Pages 671-683.

- [19] Šarlej, M.; Puchýř, R.; Šikula, J., Zavádění nejlepších dostupných technologií ve spalovně odpadů - 4D filtrace, In *Zborník konferencie Ochrana Ovzdušia 2011*, Štrbské pleso, Slovenská republika, 2011, s. 124-126

ABSTRACT

This doctoral thesis focuses on modelling as an efficient tool in industrial practice in the field of power industry and environmental engineering. It represents the modelling for technical as well as for economic part and their combination.

Industrial companies do not evaluate only technical solutions in terms of investment costs, however, they search for optimized technical-economic solutions.

The doctoral thesis describes the modelling of individual equipment as well as technological units in various levels of complexity.

Case studies utilising various levels of modelling are represented herein.

ABSTRAKT

Dizertační práce se zabývá problematikou modelování jako účinného nástroje použitelného v průmyslové praxi v oblasti procesního průmyslu a energetiky a ochrany životního prostředí. Je zde představeno jak modelování části technické, tak i ekonomické a zároveň jejich propojení.

Podniky v případě potřeby nehodnotí pouze technické řešení s ohledem na investiční náklady a návratnost investic, ale hledají optimalizované řešení po stránce technické i ekonomické s důrazem na provozní, energetické a další náklady.

Dizertační práce se zaměřuje jak na modelování jednotlivých zařízení, tak i technologických jednotek, a to v různých úrovních komplexnosti.

Jsou zde uvedeny konkrétní případové studie využívající různé úrovně modelování.