



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

STANOVENÍ TEPELNÉHO VÝKONU OHŘEVNÉ TRUBKOVÉ PECE

DETERMINATION OF FIRED HEATER HEAT DUTY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Roman Slowik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav procesního inženýrství
Student:	Roman Slowik
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.
Akademický rok:	2017/18

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:

Stanovení tepelného výkonu ohřevné trubkové pece

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na posouzení vlastností zjednodušeného simulačního výpočtu pro stanovení tepelného výkonu ohřevné trubkové pece určením absorbovaného tepla ohřivaným uhlovodíkovým proudícím v trubkovém systému pece, publikovaného v časopise Chemical Engineering Research and Design v roce 2017 jako nový a inovativní způsob rychlého výpočtu tepelného výkonu ohřevné trubkové pece bez potřeby nákladného komerčního simulačního softwaru. Tepelný výkon pece patří mezi parametr se zásadním významem, neboť od hodnoty tepelného výkonu se odvíjejí veškeré projekčně–konstrukční aktivity, jako je výběr typu ohřevné pece, rozvržení tepelného výkonu na jednotlivé části pece a návrh dílčích teplosměnných ploch pece. Účelem práce je aplikovat zmíněnou inovativní výpočtovou metodou na zadané případy ohřevných trubkových pecí, porovnat hlavní výsledky dosažené touto metodou s výsledky standardního projekčního simulačního výpočtu provedeného komerčním simulátorem a posoudit vypovídající schopnost a přesnost prověřované metody.

Cíle bakalářské práce:

1. Seznámit se s novým způsobem výpočtu tepelného výkonu ohřevných trubkových pecí, publikovaným v časopise Chemical Engineering Research and Design.
2. Ve vhodném výpočtovém prostředí zpracovat tento nový způsob výpočtu ve tvaru rutinního výpočtového nástroje pro praktický výpočet tepelného výkonu pece.
3. Aplikovat takto vytvořený výpočtový nástroj na konkrétní zadané případy ohřevné trubkové pece a porovnat hlavní výsledky dosažené touto metodou s dostupnými výsledky simulačního výpočtu provedeného komerčním simulátorem.
4. Posoudit vypovídající schopnost a přesnost prověřovaného nového způsobu výpočtu tepelného výkonu.

Seznam doporučené literatury:

PLELLIS-TSALTAKIS, C., 2017, A shortcut procedure for calculation of process side heat duty of refinery fired heaters, Chemical Engineering Research and Design, 124, pp. 152–158.

JETHVA, M.N. and BHAGCHANDANI, C. G., 2013, Fired Heater Design and Simulation, International Journal of Engineering Trends and Technology, 4 (2), pp. 159–164.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Zpracování a aplikace nové alternativní metody výpočtu tepelného výkonu procesních trubkových pecí, publikované v časopise *Chemical Engineering Research and Design*, je hlavním cílem této práce. Alternativní metoda je zpracována ve vhodném výpočtovém prostředí a vytvořený výpočtový nástroj je následně aplikován na zadané průmyslové případy procesních trubkových pecí. Je provedeno posouzení přesnosti nové alternativní metody na základě srovnání obdržných výsledků z řešených průmyslových případů s dostupnými výsledky z komerčních simulačních softwarů.

Klíčové slova

ohřevná trubková pec, tepelný výkon, absorbované teplo

ABSTRACT

The compilation and application of a new alternative method of calculating the heat duty of process tubular furnaces, published in the journal *Chemical Engineering Research and Design*, is the main objective of this work. The alternative method is processed in a suitable computational environment and the created calculation tool is subsequently applied to the given industrial cases of process tubular furnaces. An assessment of the accuracy of the new alternative method is performed on the basis of a comparison of the results obtained from the industrial cases with available results from commercial simulation software.

Key words

Tubular furnace, direct fired heater, thermal duty, absorbed heat

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLOWIK, R. *Stanovení tepelného výkonu ohřevné trubkové pece*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. XY s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Zdeňka Jegly, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne

.....

Slowik Roman

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto svému vedoucímu doc. Ing. Zdeňku Jeglovi Ph.D. za odborné vedení bakalářské práce, vstřícnost při konzultacích a cenné rady.

Obsah

ABSTRAKT	4
ABSTRACT	4
BIBLIOGRAFICKÁ CITACE	5
ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ.....	6
PODĚKOVÁNÍ.....	7
1 Úvod	9
1.1 Úvodní představení ohřevné trubkové pece	9
1.2 Základní typy a konstrukční provedení ohřevných trubkových pecí.....	10
1.3 Výpočty související s návrhem ohřevné trubkové pece	11
2 Alternativní metoda stanovení tepelného výkonu pece	13
2.1 Výpočtové vztahy alternativní metody	13
2.2 Navržená modifikace alternativní metody	16
2.3 Algoritmus výpočtu	18
3 Programové zpracování výpočtu a aplikace vytvořeného výpočtového nástroje.....	19
3.1 Vytvořené výpočtové nástroje	19
3.2 Řešení průmyslových případů	20
3.2.1 Průmyslový případ 1	20
3.2.2 Průmyslový případ 2	21
3.2.3 Průmyslový případ 3	22
3.2.4 Průmyslový případ 4	23
4 Závěr a souhrnné zhodnocení výsledků	25
5 Citovaná literatura.....	26
Seznam použitých symbolů	27
Seznam příloh.....	28
Příloha 1: Zápis postupu výpočtu v programu Octave 4.2.1	29

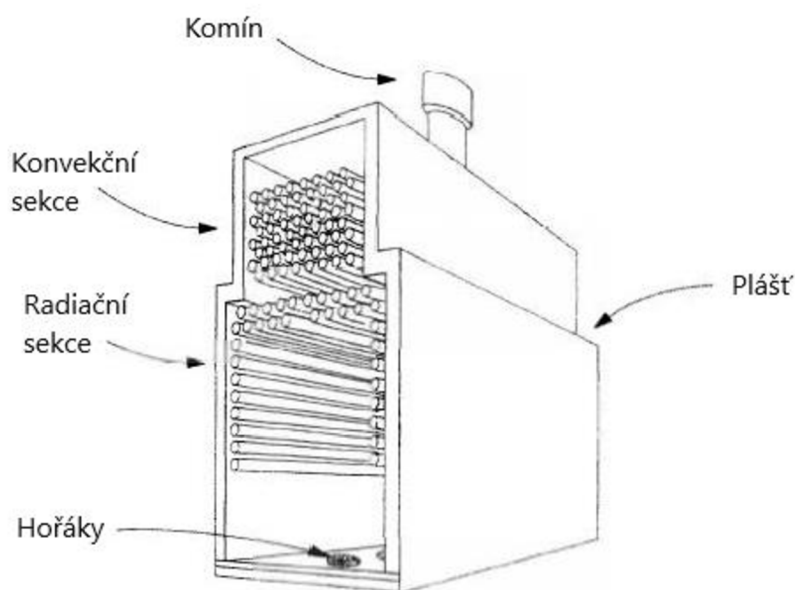
1 Úvod

V této práci je představena nová alternativní metoda výpočtu tepelného výkonu, který je jedním z hlavních parametrů trubkových ohřevných pecí. S tepelným výkonem je přímo spojená i tepelná účinnost, na jejíž zvyšování je v současné době z důvodu snižování provozních nákladů kladen velký důraz.

1.1 Úvodní představení ohřevné trubkové pece

Ohřevné pece byly vyvinuty počátkem devatenáctého století v reakci na rostoucí požadavky kladené na ropné produkty a následně procházely neustálým vývojem [1]. V současné době jsou nezbytnou součástí všech procesních zařízení zpracování ropy. Jsou primárně používány k ohřevu všech typů kapalných uhlovodíkových směsí, proudů plynů, par nebo vzduchu [2].

Trubkové ohřevné pece jsou obecně spalovací zařízení, v nichž je teplo vzniklé spalováním paliva předáváno ohřivanému procesnímu médiu proudícím trubkovým hadem. Po ohřátí v peci je obvykle procesní médium vedeno na zpracování do klíčového zařízení výrobního procesu. Ohřevné trubkové pece mohou mít různá uspořádání. Typická ohřevná trubková pec se skládá z těchto hlavních částí: radiační sekce (v níž se nachází hořáky), konvekční sekce a komína [3]. Radiační a konvekční sekce jsou přitom umístěny v plášti pece. Uspořádání ohřevné trubkové pece je znázorněno na obrázku 1.



Obrázek 1: Základní uspořádání trubkové ohřevné pece [4]

Plášť pece je tvořen ocelovou konstrukcí lemovanou žáruvzdorným materiálem neboli vyzdívkou. Hlavní funkcí vyzdívkou je zamezování úniku tepla, vznikajícího spalováním paliva (oleje nebo plynu) v hořácích [2] a ochrana nosné ocelové konstrukce před korozí a přehříváním [1]. Samotný trubkový had se skládá z trubek tvořících trubkové svazky v konvekční sekci a z trubek umístěných podél stěn a stropu radiační (spalovací) komory a spojených do trubkového hadu obrátovými koleny. Pohled do nitra reálné ohřevné pece je zobrazen na obrázku 2, kde lze vidět vyzdívkou, upevnění trubkového hadu a kruhové otvory hořákových kamenů ve dnu pece.



Obrázek 2: Pohled do nitra trubkové pece [5]

K předávání tepla ohřivané procesní látce dochází při jejím postupném průchodu trubkovým systémem, nejprve v konvekční a následně v radiační sekci pece.

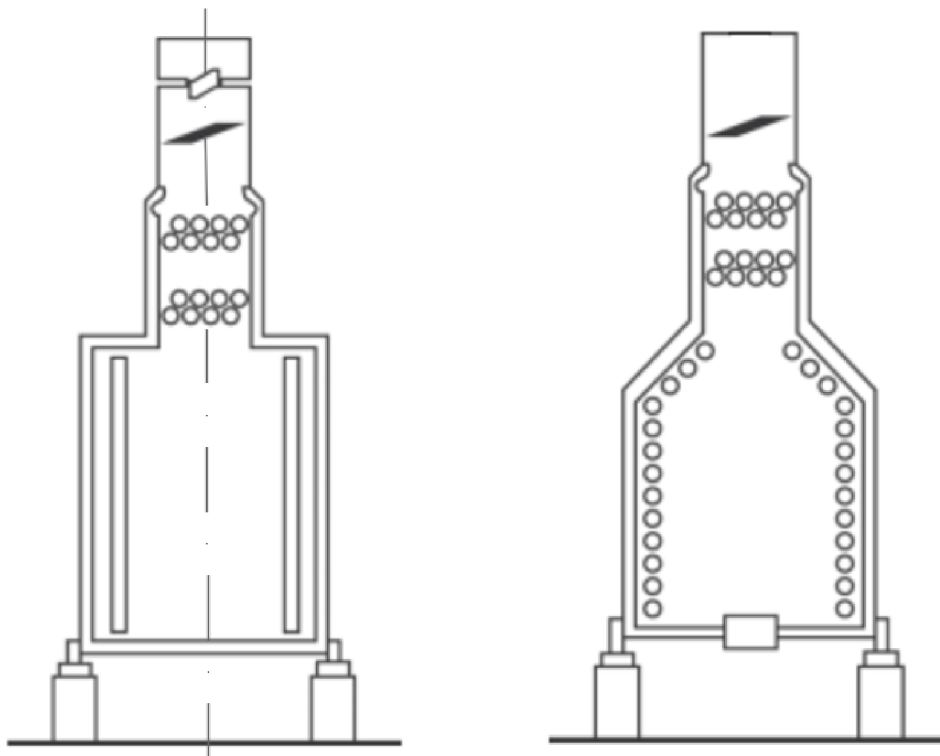
V radiační sekci jsou trubkové hady typicky tvořeny pouze z hladkých trubek, jelikož ohřev proudícího média je zde realizován radiací tedy přenosem tepelné energie zářením ze spalin vznikajících spalováním paliva v hořácích.

V konvekční sekci jsou trubky obvykle uloženy v řadách nad sebou a jsou dominantně ohřívány konvekcí neboli prouděním spalin, avšak první řady trubek konvekční sekce (nacházející se hned nad radiační sekci) jsou obvykle také vystaveny radiaci spalin proudících z hořáků. Trubky v konvekční části bývají často opatřeny žebry nebo trny z důvodu zvětšení plochy výměny tepla s výjimkou zmíněných několika prvních řad, jež jsou z důvodu kombinovaného radiačně-konvekčního sdílení tepla významně tepelně namáhány a zpravidla dosahují nejvyšších hodnot přenosu tepla vůbec v celé peci [1].

Hlavní funkcí komínu pece je odvod spalin a regulace tahu spalin, jež má zásadní vliv na správný chod pece. Tah spalin je regulován pomocí klapek umístěných v dolní části komína. Vstup ohřivaného procesního proudu do pece je zpravidla umístěn pod vrcholem pece a obvykle se nachází daleko výše než výstup z pece [1].

1.2 Základní typy a konstrukční provedení ohřevných trubkových pecí

V současné době se pec obvykle realizuje v některém ze dvou základních typů trubkových ohřevných pecí. Buď se jedná se o vertikální válcovou pec anebo o šachtovou pec, jejichž znázornění je na obrázku 2. Rozdíl mezi těmito typy je dán samotným tvarem pece a radiační (spalovací) komory. Liší se rovněž orientací trubkového hadu v radiační sekci pece, který je ve vertikálních válcových pecích orientován vertikálně, kdežto v šachtových pecích je uložen horizontálně. Detailní konfigurace a konstrukce obou typů pecí se také mohou dále lišit s ohledem na požadavky dané procesní aplikací [1].



Obrázek 3: Základní typy trubkových ohřevných pecí, vlevo válcová vertikální pec, vpravo šachtová pec [6]

V porovnání obou výše zmíněných typů trubkových ohřevných pecí patří k výhodám válcových provedení (jež jsou i konstrukčně mladším typem) jejich menší rozměry, z čehož plynou menší nároky na zastavěný prostor, menší množství potřebného konstrukčního materiálu, snazší montáž a tím i celkově nižší pořizovací náklady. Z procesního hlediska tento typ pecí umožňuje relativně rovnoměrnější rozložení toku tepla uvnitř radiační sekce a tím přispívá ke snížení rizika místního přehřívání trubek. Naopak k jejich nevýhodám, které jsou přímým důsledkem menších rozměrů, patří menší vzdálenost trubkového hadu v radiační sekci od hořáků a větší tlaková ztráta ohřívané látky způsobená kratší délkou trubek v konvekční sekci a větším počtem obrátových kolen. S ohledem na své rozměrové možnosti také vertikální válcové pece nedosahují tak vysokých hodnot tepelného výkonu, jako některé konfigurace šachtových pecí. V neposlední řadě je s válcovým typem pece spojena obtížnější údržba a komplikovanější případná výměna radiačních trubek [1].

1.3 Výpočty související s návrhem ohřevné trubkové pece

Obecně řečeno jsou ohřevné pece navrhovány vždy s ohledem na procesní a finanční požadavky zákazníka. Základní specifikace jsou přitom dány vlastnostmi, množstvím a požadovanými vstupními a výstupními parametry ohřívané procesní látky. Při návrhu pece pak musí být rovněž brány v úvahu další faktory jako dostupná velikost pro zastavěný prostor, povětrnostní podmínky, dostupnost požadovaných materiálu, emisní limity atd. [1].

Při návrhu každé ohřevné trubkové pece se tak využívá celá řada různých výpočtů. Jde zejména o tepelný výpočet pece, hydraulický výpočet ohřívané pracovní látky a tzv. aerodynamický výpočet strany spalin sloužící k návrhu komína pece. Samozřejmostí jsou také

pevnostní výpočty jednotlivých komponent ohřevné pece. Na počátku návrhu každé pece však stojí výpočet tepelného výkonu pece, tj. množství tepla, které musí ohřívána látka v trubkách pece absorbovat. Tepelný výkon pece je tak jedním ze základních vstupních údajů důležitých pro vlastní návrh trubkové pece.

Návrh jakékoliv ohřevné trubkové pece tak začíná výpočtem jejího tepelného výkonu tedy celkového absorbovaného tepla, jež musí být rovno součtu tepla absorbovaného ohřívaným proudem (nebo proudy) v radiační a konvekční sekci pece a je přímo závislé na procesních požadavcích.

Na základě stanoveného tepelného výkonu pece pak lze zvolit vhodný typ pece a následně navrhnout provedení jednotlivých částí pece a určit potřebné výchozí konstrukční a technologické parametry jako například plochu trubkového hadu v jednotlivých sekcích pece, tepelnou účinnost pece apod. Na jejich základě lze následně navrhnout vhodné konkrétní uspořádání, tj. počet řad, rozměry, materiál, průměry trubek a žebrování trubkového hadu.

Následně je nutno rovněž určit tlakovou ztrátu ohřívání látky proudící navrženým trubkovým hadem, jenž má značný vliv na dimenzování a volbu čerpadel a ventilů a také ověřit konstrukci trubkového hadu z hlediska hydrostatiky se zohledněním maximálních vznikajících tlaků, aby nedošlo k jeho poškození vlivem proudění ohřívání látky.

V dalších krocích lze postupně navrhnout upevnění trubkového hadu i se zahrnutím možné teplotní dilatace, materiál a tloušťku vyzdívky, průměr a výšku komína společně s klapkami pro regulaci tahu pece. V neposlední řadě je nutno zvolit vhodný typ a počet hořáků s ohledem na požadovaný tepelný výkon a na jeho požadovanou regulovatelnost. Nakonec je potřeba navrhnout a výpočtově zkontrolovat nosnou ocelovou konstrukci a plášť pece se zohledněním celkové hmotnosti použitého materiálu a ohřívání procesní látky v trubkovém hadu. Při návrhu pláště je nutno (s ohledem na ztráty tepla do okolí) rovněž brát v úvahu celkové umístění pece a místní okolní povětrnostní podmínky [1].

Tato bakalářská práce je zaměřena na první fázi návrhu ohřevné trubkové pece, konkrétně na výpočet tepelného výkonu pece. Bude představena nová alternativní metoda výpočtu tepelného výkonu ohřevné trubkové pece publikovaná v odborné literatuře a prakticky posouzeny schopnosti této metody její aplikací na konkrétních průmyslových případech ohřevných trubkových pecí.

2 Alternativní metoda stanovení tepelného výkonu pece

V této kapitole je detailně představen nový postup pro stanovení tepelného výkonu pece publikovaný v časopise *Chemical Engineering Research and Design* v roce 2017 pod názvem *A shortcut procedure for calculation of proces side heat duty of refinery fired heaters* [7]. Součástí této kapitoly je rovněž potenciální modifikační úprava tohoto postupu navržená autorem této bakalářské práce pro výpočty tepelných výkonů pecí pro procesy s výrazně odlišnými pracovními podmínkami, než uvažuje [7].

2.1 Výpočtové vztahy alternativní metody

Článek [7] se zabývá problematikou určení tepelného výkonu ohřevných trubkových pecí v rafinerském průmyslu. Samotný postup určení tepelného výkonu je rozdělen do tří částí. První část slouží k výpočtu tepla absorbovaného médiem během ohřevu na výstupní teplotu. Ve druhé části je určeno teplo absorbované během částečného odpaření média v trubkovém hadu a třetí část slouží k určení tepla spotřebovaného ohřevem přídavných proudů. Dle autora přesnost navržené metody je srovnatelná s přesností, jíž dosahují simulačními softwary. V této bakalářské práci se využije s ohledem na zadané průmyslové případy pouze první a druhá část, čili určení tepla absorbovaného během ohřevu a během částečného odpaření média. Samotný postup výpočtu se skládá z několika kroků, jež mohou být snadno realizovatelné bez nutnosti využití speciálního výpočtového softwaru [7].

Výpočet pracuje s následujícími vstupními daty [7]:

- Hmotnostní tok média protékajícího pecí
- TBP (True Boiling Point) destilační křivka média při 100 kPa
- Watsonův charakterizační faktor
- Specifická (poměrná) hustota (specific gravity) - tj. poměr hustoty látky k hustotě porovnávací látky (vody) při 60F (při 15,6°C)
- Tlak na výstupu pece
- Vstupní a výstupní teplota uhlovodíkové směsi

Jsou-li potřebná data k dispozici, lze realizovat výpočet v následující posloupnosti kroků.

1. První krok slouží k výpočtu střední molární hmotnosti MW [g/mol] pomocí rovnice:

$$\begin{aligned} MW = & -12272,6 + 9486,4SG_{60} + (8,37414 - 5,99166SG_{60})T_B \\ & + (1 - 0,77084SG_{60} - 0,02058SG_{60}^2) \frac{\left(0,7465 - \frac{222,466}{T_B}\right) 10^7}{T_B} \\ & + (1 - 0,80882SG_{60} - 0,02226SG_{60}^2) \frac{\left(0,32284 - \frac{17,3354}{T_B}\right) 10^{12}}{T_B^3} \end{aligned} \quad (2.1.1)$$

Kde SG_{60} je výše zmíněná specifická hustota (specific gravity) uhlovodíkové směsi směsi [-], T_B je teplota průměrného bodu varu směsi definovaná jako teplota TBP destilační křivky při 100 kPa při níž procentuální podíl odpařené fáze v médiu dosahuje 50 % [K].

2. Parciální tlak média na výstupu z pece $P_{H/C}$ [kPa], lze určit pomocí následující rovnice:

$$P_{H/C} = P \frac{Mol_{H/C}}{Mol_{H/C} + Mol_{inerts}} \quad (2.1.2)$$

Kde P je tlak na výstupu pece [kPa], $Mol_{H/C}$ je molární tok uhlovodíkové směsi [kmol/h] určený jako podíl hmotnostního toku média a střední molární hmotnosti média z bodu 1, Mol_{inerts} je molární tok inertních podílů v médiu [kmol/h].

3. V dalším kroku se provádí přepočítání bodů TBP destilační křivky při 100 kPa na parciální tlak na výstupu pece. Toho lze docílit pomocí následujících rovnic:

$$X = \frac{5,994296 - 0,972546 \log_{10}(7,5006P_{H/C})}{2663,129 - 95,76 \log_{10}(7,5006P_{H/C})} \quad (2.1.3)$$

$$T_{PH/C} = \frac{748.1XT}{1 + T(0,3861X - 0,00051606)} \quad (2.1.4)$$

$$TC_{PH/C} = T_{PH/C} + 1,389f(K_W - 12)(\log_{10}(7,5006P_{H/C}) - 2,8808) \quad (2.1.5)$$

Kde

$$f = 0 \text{ pro } T_{PH/C} < 366K$$

$$f = \frac{T_{PH/C} - 366}{111} \text{ pokud } 366K < T_{PH/C} < 477K$$

$$f = 1 \text{ pro } T_{PH/C} > 477K$$

Kde X je parametr pro rovnici (2.1.4), $P_{H/C}$ je parciální tlak uhlovodíku na výstupu pece [kPa], T je příslušný teplotní bod TBP destilační křivky při 100 kPa [K], $T_{PH/C}$ je příslušný teplotní bod TBP destilační křivky při parciálním tlaku [K], f je korekční parametr pro rovnici (2.1.5), $TC_{PH/C}$ je příslušný teplotní bod TBP destilační křivky při parciálním tlaku upravené pro aromaticitu ropné frakce [K].

Poznámka: V rovnicích (2.1.3) a (2.1.5) bylo nutno konstantu 0,1333 z důvodu chybného přepočtu jednotek tlaku z mmHg na kPa vyskytujícího se v článku [7] nahradit správnou převodní konstantou 7,5006.

4. Další krok slouží k určení procentuálního podílu odpařené fáze EV [%] v médiu. Toho lze docílit lineární interpolací teploty na výstupu z pece v TBP destilační křivce přepočítané na parciální tlak v bodě 3.

5. Průměrný bod varu odpařené fáze T_{EV} [K] lze určit lineární interpolací v původní TBP destilační křivce při 100 kPa jako teplota, která odpovídá polovičnímu podílu odpařené fáze v médiu určeného v bodě 4.

6. Specifická hustota média SG , které bylo v peci odpařené je při průměrném bodu varu T_{EV} dána rovnicí:

$$SG = \frac{\sqrt[3]{1,8T_{EV}}}{K_W} \quad (2.1.6)$$

Kde T_{EV} je průměrný bod varu odpařené fáze [K], K_W je Watsonův charakterizační faktor [-].

7. Kritické parametry uhlovodíkové směsi jako je kritický tlak P_C [Pa] a kritická teplota T_C [K] lze určit pomocí následujících rovnic:

$$\begin{aligned} \ln P_C = & 17,2019 - \frac{0,0566}{SG} - \left(0,43632 + \frac{4,12164}{SG} + \frac{0,213426}{SG^2} \right) 10^{-3} T_{EV} \\ & + \left(4,75794 + \frac{11,81952}{SG} + \frac{1,5301548}{SG^2} \right) 10^{-7} T_{EV}^2 \\ & - \left(2,4505 + \frac{9,9}{SG^2} \right) 10^{-10} T_{EV}^3 \end{aligned} \quad (2.1.7)$$

$$\begin{aligned} T_C = & 189,83 + 450,56SG + (0,4244 + 0,1174SG)T_{EV} \\ & + \frac{(0,1441 - 1,0069SG)10^5}{T_{EV}} \end{aligned} \quad (2.1.8)$$

Kde SG je měrná hmotnost média, jež bylo v peci odpařené určená v bodě 6 [-], T_{EV} je teplota průměrného bodu varu [K].

8. Změna entalpie během odpařování na průměrném bodu varu ΔH_{VB} [J/mol] je dána rovnicí:

$$\Delta H_{VB} = 1,093RT_{EV} \frac{\ln(P_C/100) - 1,013}{0,93 - \frac{T_{EV}}{T_C}} \quad (2.1.9)$$

Kde R je univerzální plynová konstanta ($8,314 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$), P_C je kritický tlak [kPa], T_C je kritická teplota [K], T_{EV} je průměrný bod varu odpařené fáze [K].

9. Pokud k odpařování média nedochází při tlaku 100 kPa je nutno přepočítat výsledek z předchozího kroku na skutečné pracovní podmínky [7]. Změnu entalpie během odpařování při pracovních podmínkách ΔH_V [J/mol] lze určit pomocí rovnice:

$$\Delta H_V = \Delta H_{VB} \left(\frac{1 - \frac{T_1}{T_C}}{1 - \frac{T_{EV}}{T_C}} \right)^{0,38} \quad (2.1.10)$$

Kde ΔH_{VB} je změna entalpie během odpařování na průměrném bodu varu [J/mol], T_1 je teplota uhlovodíkové směsi na výstupu pece [K], T_C je kritická teplota [K], T_{EV} je průměrný bod varu odpařené fáze [K].

10. Změna měrné entalpie Q [kJ/kg] absorbovaného média během ohřevu na výstupní teplotu, lze určit pomocí následující rovnice, jež předpokládá, že celý objem média zůstává po celou dobu ohřevu ze vstupní na výstupní teplotu v kapalném stavu:

$$Q = 2,3263 \left[A_1 A_2 (1,8COT - 459,688) + \frac{A_1 A_3 (1,8COT - 459,688)^2}{2} - A_1 A_2 (1,8CIT - 459,688) - \frac{A_1 A_3 (1,8CIT - 459,688)^2}{2} \right] \quad (2.1.11)$$

Kde COT je teplota na výstupu pece [K], CIT je teplota na vstupu pece [K] a koeficienty A_1 , A_2 , A_3 závislé na složení vstupní suroviny jsou dány vztahy:

$$A_1 = 0,055K_W + 0,35 \quad (2.1.12)$$

$$A_2 = 0,6811 - 0,308SG_{60} \quad (2.1.13)$$

$$A_3 = 0,000815 - 0,000306SG_{60} \quad (2.1.13)$$

Kde K_W je Watsonův charakterizační faktor [-], SG_{60} je specifická hustota [-].

11. Celkové teplo absorbované ohřivaným médiem je rovno součtu výsledků z bodů 9 a 10 vynásobených příslušnými molárními a hmotnostními toky, čímž se určí hledaný tepelný výkon pece.

2.2 Navržená modifikace alternativní metody

Během testovacích výpočtů byla zjištěna značná nepřesnost výše popsané alternativní metody pro případy ohřevných pecí procesů vakuové destilace ropy. U těchto případů dochází k největším odchylkám vůči reálnému stavu během výpočtu procentuálního podílu odpařené fáze v ohřivaném médiu, jež je přímo určován z TBP destilační křivky při 100 kPa

přepočítané na parciální tlak na výstupu pece. Z toho plyne, že k největší chybě alternativní metody musí docházet během samotného přepočtu destilační křivky v kroku 3. Z tohoto důvodu byl pro případ pecí vakuové destilace ropy původní přepočet destilační křivky nahrazen přepočtem, popsáním v [8].

Dle [8] lze přepočítat body TBP destilační křivky při 100 kPa na nižší tlak pomocí následujících rovnic:

$$X = \frac{5,994296 - 0,972546 \log_{10}(7,5006P_{H/C})}{2663,129 - 95,76 \log_{10}(7,5006P_{H/C})} \quad (2.2.1)$$

$$T_{PH/C} = T + 1,3889f(K_W - 12) \log_{10} \left(\frac{7,5006P_{H/C}}{760} \right) \quad (2.2.2)$$

$$f = 0 \text{ pro } T < 367K; f = -3,2985 + 0,009T \text{ pro } T > 367K$$

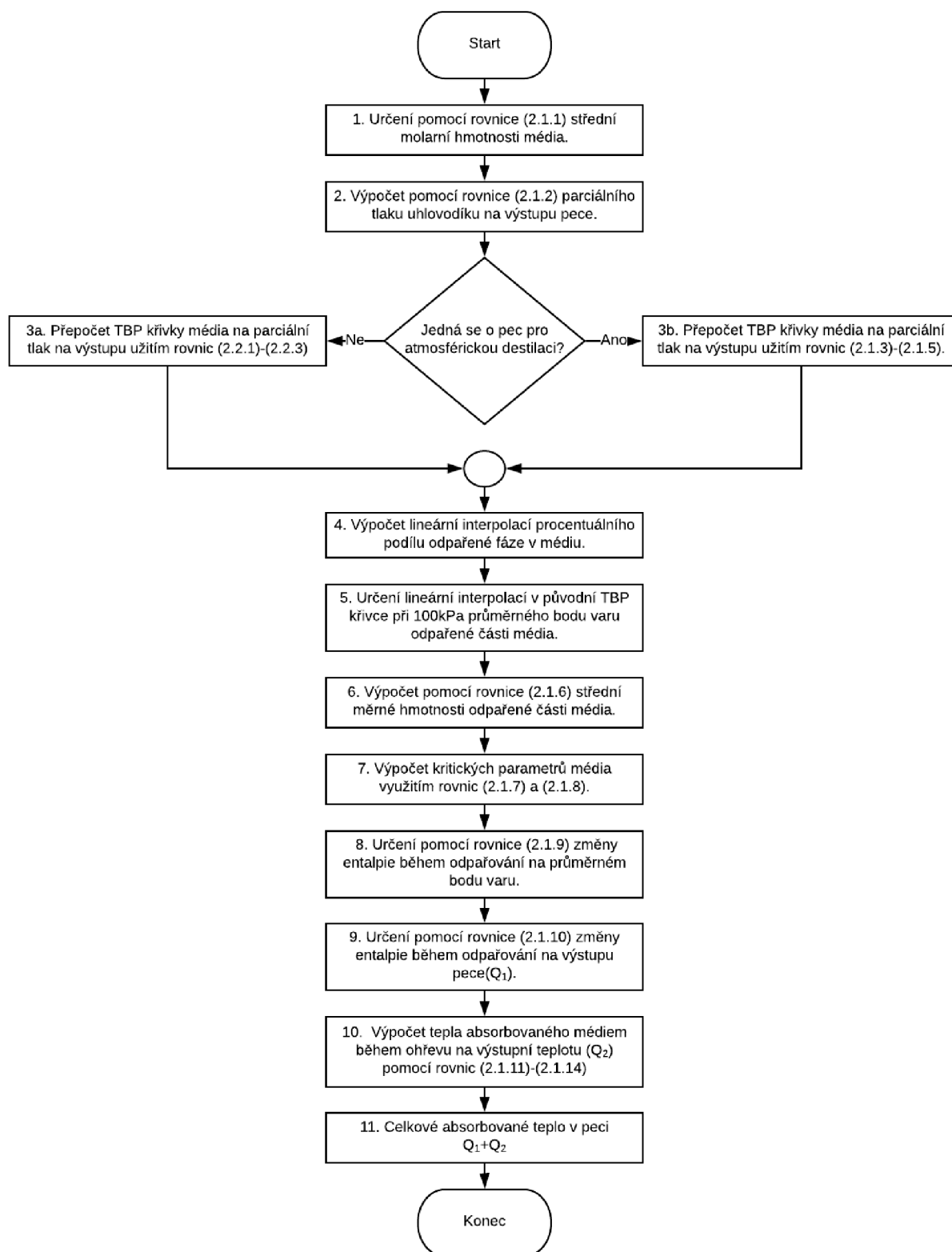
$$TC_{PH/C} = \frac{T_{PH/C}}{748,1X - T_{PH/C}(0,3861X - 0,00051606)} \quad (2.2.3)$$

Kde X je parametr pro rovnici (2.2.3), $P_{H/C}$ je parciální tlak uhlovodíku na výstupu pece [kPa], T je příslušný teplotní bod TBP destilační křivky při 100 kPa [K], f je korekční parametr pro rovnici (2.2.2), $T_{PH/C}$ je příslušný teplotní bod TBP destilační křivky při parciálním tlaku [K], $TC_{PH/C}$ je příslušný teplotní bod TBP destilační křivky při parciálním tlaku upravené pro aromaticitu ropné frakce [K] [8].

Zbývající část postupu výpočtu zůstává stejná jako v kapitole 2.1.

2.3 Algoritmus výpočtu

Na základě poznatků z testovacích výpočtů je navržen ucelený algoritmus výpočtu s aplikovanou úpravou přepočtu destilační křivky v závislosti na druhu destilace ropy. Toto blokové výpočtové schéma je zobrazené na obrázku 4.



Obrázek 4: Blokové schéma postupu výpočtu s aplikovanou modifikační úpravou

3 Programové zpracování výpočtu a aplikace vytvořeného výpočtového nástroje

Výše uvedený algoritmus výpočtu byl programově zpracován do praktického výpočtového nástroje. Výpočtový nástroj byl následně aplikován na řešení čtyř průmyslových případů. Bližší informace k tomu podají následující podkapitoly.

3.1 Vytvořené výpočtové nástroje

Postup výpočtu, uvedený v kapitole 2 byl zpracován v programech Microsoft Excel 2010, zobrazeném na obrázku 5 a ve výpočtovém prostředí Octave verze 4.2.1 zobrazeném na obrázku 6. Zpracování v programu Excel je rozděleno do dvou různých nástrojů, z nichž jeden je určen pro původní metodu a druhý pro metodu modifikovanou, z nichž je nutno volit s ohledem na typ destilace. Oproti tomu postup výpočtu v prostředí Octave je plně automatizován, je nutno pouze zadat požadovaná vstupní data a společně s nimi určit typ destilace. Zápis programu tvoří Přílohu 1 této práce.

Vstupní data			Výstupní data			Přepočet destilační křivky				
Hmotnostní tok média	375000	kg/h	1. Střední molární hmotnost	439,55	g/mol	X	EV	Tphc [K]	f [f]	TCphc [K]
Watsonův charakterizační faktor	11,866	-	2. Parciální tlak uhlovodíku na výstupu pece	16	kPa	0,001612	1%	596,0	1,00	596,2
Specifická hustota média při 15,6°C	0,949	-	3. TBP destilační křivka média na výstupu:				5%	691,7	1,00	691,9
Tlak na výstupu pece	16	kPa	1%	596,2	K		10%	726,9	1,00	727,1
Teplota na vstupu pece	340	°C	5%	691,9	K		30%	804,6	1,00	804,8
Teplota na výstupu pece	388,2	°C	10%	727,1	K		50%	868,8	1,00	868,9
TBP destilační křivka při 100 kPa:			30%	804,8	K		70%	949,4	1,00	949,5
1%	248,5	°C	50%	868,9	K		90%	1086,4	1,00	1086,5
5%	337,7	°C	70%	949,5	K		95%	1164,5	1,00	1164,7
10%	370,9	°C	90%	1086,5	K		99%	1212,8	1,00	1212,9
30%	445	°C	95%	1164,7	K					
50%	507	°C	99%	1212,9	K					
70%	586	°C	4. Procentuální podíl odpařené fáze	3,72%	%	Koefficienty A1-A3				
90%	723,1	°C	5. Průměrný bod varu odpařené fáze	540,9	K	A1	A2	A3		
95%	803	°C	6. Specifická hustota odpařené média	0,8353	-	1,00268	0,3888	0,00052		
99%	852,9	°C	7. Kritický tlak odpařené směsi	1826,19	kPa	Indexy ln. int.				
			8. Kritická teplota odpařené směsi	719,9	K	1	1			
			9. Teplota potřebná na odpaření na průměrném bodu varu	52039	J/mol	2	2			
			10. Teplota potřebná na odpaření při pracovních podmínkách	34030	J/mol					
			11. Teplota pro ohřev média na výstupní teplotu	151,65	kJ/kg					
				16,097	MW					

Obrázek 5: Zpracování postupu výpočtu v programu Microsoft Excel

```
5 %krok 1 Střední molární hmotnost média MW
6 i=1;
7 while T(1,1)~=50
8   i=i+1;
9   end
10 MW=-12272.6+9486.4*SG60+(8.37414-5.99166*SG60)*T(1,2)+(1-0.77084*SG60-0.02058*SG60^2)*(0.7465-
11
12 %krok 2 Parciální tlak na výstupu Phc
13 MOLhc=MF/MW;% Molární tok uhlovodíku
14 Phc=Pout*MOLhc/(MOLhc+MOLInerts);
15
16 %krok 3 Přepočet TBP destilační křivky při 100 kPa na parciální tlak TCphc
17 X=(5.994296-0.972546*log10(7.50061683*Phc))/(2663.129-95.76*log10(7.50061683*Phc));
18 Tphc=T;
19 TCphc=T;
20 f=T;
21 if A>0;
22   for i=1:size(T)(1);
23     Tphc(i,2)=748.1*X*T(i,2)/(1+T(i,2)*(0.3861*X-0.00051606));
24     if Tphc(i,2)<366;
25       f(i,2)=0;
26     elseif 477<Tphc(i,2);
27       f(i,2)=1;
28     else
29       f(i,2)=(Tphc(i,2)-366)/111;
30     end
31   end
32   TCphc(i,2)=Tphc(i,2)+1.389*f(i,2)*(Kw-12)*(log10(7.50061683*Phc)-2.8808);
33 end
```

Obrázek 6: Zpracování postupu výpočtu v prostředí Octave 4.2.1

3.2 Řešení průmyslových případů

V této kapitole jsou postupně popsány zadání čtyř průmyslových případů a výsledky dosažené alternativní metodou v jejím původním znění v kapitole 2.1 V případech číslo 2 a 4, v nichž se jedná o pece vakuové destilace ropy, jsou uvedeny rovněž výsledky pro modifikovaný postup výpočtu, popsany v kapitole 2.2. Všechny čtyři řešené případy se vyznačují nulovým obsahem inertních plynů v ohřivaném proudu (tj. parametr $Mol_{inerts}=0$).

3.2.1 Průmyslový případ 1

Jedná se o soustavu dvou stejných vertikálních válcových ohřevných pecí, v nichž dochází k předeřevu ropy pro atmosférickou destilaci ropy. Jmenovitý tepelný výkon soustavy pecí je 47,571 MW. Vstupní data pro tento průmyslový případ jsou uvedeny v následující tabulce 1 a obdržené výsledky jsou uvedeny v tabulce 2.

Tabulka 1: Tabulka vstupních údajů pro 1. průmyslový případ

Vstupní data		
Hmotnostní tok média	351 249	kg/h
Watsonův charakterizační faktor	11,8	-
Specifická hustota média při 15,6 °C	0,844 2	-
Tlak na výstupu pece	227	kPa
Teplota na vstupu pece	217	°C
Teplota na výstupu pece	345	°C
TBP destilační křivka při 100 kPa:		
1%	50,3	°C
5%	77,3	°C
10%	106,6	°C
30%	223,8	°C
50%	310,5	°C
70%	414,1	°C
90%	564,1	°C
95%	640,0	°C
99%	778,6	°C

Tabulka 2: Tabulka výsledků 1. průmyslového případu

Výstupní data		
1. Střední molární hmotnost	209,6	g/mol
2. Parciální tlak uhlovodíku na výstupu pece	227	kPa
3. TBP destilační křivka média na výstupu		
1%	297,9	K
5%	323,2	K
10%	350,6	K
30%	461,4	K
50%	544,3	K
70%	644,2	K
90%	790,8	K
95%	865,8	K
99%	1 004,2	K
4. Procentuální objemový podíl odpařené fáze	64,78	% obj.
5. Průměrný bod varu odpařené fáze	507,3	K
6. Specifická hustota odpařeného média	0,822 2	-
7. Kritický tlak odpařené směsi	2 055,1	kPa
Kritická teplota odpařené směsi	689,8	K
8. Teplo potřebné na odpaření na průměrném bodu varu	47 638	J/mol
9. Teplo potřebné na odpaření při pracovních podmínkách	33 391	J/mol
10. Teplo pro ohřev média na výstupní teplotu	385,76	kJ/kg
11. Celkový výkon pece	47,697	MW

3.2.2 Průmyslový případ 2

Jedná se o šachtovou pec jednotky vakuové destilace ropy o jmenovitém tepelném výkonu 21,784 MW. Vstupní data pro tento případ jsou uvedeny v následující tabulce 3, vypočtené výsledky původním zněním alternativní metody jsou uvedeny v tabulce 4 a výsledky získané modifikovaným postupem jsou uvedeny v tabulce 5.

Tabulka 3: Tabulka vstupních údajů pro 2. průmyslový případ

Vstupní data		
Hmotnostní tok média	375 000	kg/h
Watsonův charakterizační faktor	11,866	-
Specifická hustota média při 15,6°C	0,949 0	-
Tlak na výstupu pece	16	kPa
Teplota na vstupu pece	340	°C
Teplota na výstupu pece	388,2	°C
TBP destilační křivka při 100kPa:		
1%	248,6	°C
5%	337,7	°C
10%	370,9	°C
30%	445,0	°C
50%	507,1	°C
70%	586,0	°C
90%	723,1	°C
95%	803,0	°C
98%	852,9	°C

Tabulka 4: Tabulka výsledků 2. průmyslového případu

Výstupní data		
1. Střední molární hmotnost	439,66	g/mol
2. Parciální tlak uhlovodíku na výstupu pece	16	kPa
3. TBP destilační křivka média na výstupu		
1%	596,2	K
5%	691,9	K
10%	727,1	K
30%	804,8	K
50%	868,9	K
70%	949,6	K
90%	1 086,5	K
95%	1 164,7	K
99%	1 212,9	K
4. Procentuální objemový podíl odpařené fáze	3,72	% obj.
5. Průměrný bod varu odpařené fáze	540,9	K
6. Specifická hustota odpařeného média	0,835 3	-
7. Kritický tlak odpařené směsi	1 825,9	kPa
Kritická teplota odpařené směsi	719,9	K
8. Teplo potřebné na odpaření na průměrném bodu varu	52 043	J/mol
9. Teplo potřebné na odpaření při pracovních podmínkách	34 040	J/mol
10. Teplo pro ohřev média na výstupní teplotu	151,65	kJ/kg
11. Celkový výkon pece	16,097	MW

Tabulka 5: Tabulka výsledků 2. průmyslového případu získaných modifikovaným postupem výpočtu

Výstupní data		
1. Střední molární hmotnost	439,66	g/mol
2. Parciální tlak uhlovodíku na výstupu pece	16	kPa
3. TBP destilační křivka média na výstupu		
1%	453,3	K
5%	535,0	K
10%	565,9	K
30%	635,3	K
50%	694,2	K
70%	770,2	K
90%	904,8	K
95%	984,9	K
98%	1 035,7	K
4. Procentuální objemový podíl odpařené fáze	38,84%	% obj.
5. Průměrný bod varu odpařené fáze	678,9	K
6. Specifická hustota odpařeného média	0,901 0	-
7. Kritický tlak odpařené směsi	1 216,01	kPa
Kritická teplota odpařené směsi	843,4	K
8. Teplo potřebné na odpaření na průměrném bodu varu	73 341	J/mol
9. Teplo potřebné na odpaření při pracovních podmínkách	76 233	J/mol
10. Teplo pro ohřev média na výstupní teplotu	151,65	kJ/kg
11. Celkový výkon pece	22,810	MW

3.2.3 Průmyslový případ 3

V tomto případě se jedná o vertikální válcovou pec o jmenovitém tepelném výkonu 16,886 MW určenou pro atmosférickou destilaci ropy. Vstupní data pro tento případ jsou uvedeny v následující tabulce 6 a obdržené výsledky jsou uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 6: Tabulka vstupních údajů pro 3. průmyslový případ

Vstupní data		
Hmotnostní tok média	136 178	kg/h
Watsonův charakterizační faktor	11,992	-
Specifická hustota média při 15,6°C	0,857 4	-
Tlak na výstupu pece	225,6	kPa
Teplota na vstupu pece	215,6	°C
Teplota na výstupu pece	343,3	°C
TBP destilační křivka při 100kPa:		
1%	-19,7	°C
5%	59,2	°C
10%	100,9	°C
30%	211,5	°C
50%	331,8	°C
70%	462,5	°C
90%	656,4	°C
95%	728,7	°C
98%	882,4	°C

Tabulka 7: Tabulka výsledků 3. průmyslového případu

Výstupní data		
1. Střední molární hmotnost	233,05	g/mol
2. Parciální tlak uhlovodíku na výstupu pece	225,6	kPa
3. TBP destilační křivka média na výstupu		
1%	232,7	K
5%	306,3	K
10%	345,5	K
30%	450,1	K
50%	565,2	K
70%	691,7	K
90%	882,5	K
95%	954,6	K
98%	1 109,7	K
4. Procentuální objemový podíl odpařené fáze	58,10	% obj.
5. Průměrný bod varu odpařené fáze	479,4	K
6. Specifická hustota odpařeného média	0,793 9	-
7. Kritický tlak odpařené směsi	2 142,8	kPa
Kritická teplota odpařené směsi	658,9	K
8. Teplo potřebné na odpaření na průměrném bodu varu	44 128	J/mol
9. Teplo potřebné na odpaření při pracovních podmínkách	25 519	J/mol
10. Teplo pro ohřev média na výstupní teplotu	384,73	kJ/kg
11. Celkový výkon pece	16,962	MW

3.2.4 Průmyslový případ 4

Jedná se o víckomorovou šachtovou pec pro vakuovou destilaci ropy o jmenovitém tepelném výkonu 18,928 MW. Vstupní data pro tento případ jsou uvedeny v následující tabulce 8, vypočtené data jsou uvedeny v tabulce 9 a výsledky získané modifikovaným postupem jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 8: Tabulka vstupních údajů pro 4. průmyslový případ

Vstupní data		
Hmotnostní tok média	162 186	kg/h
Watsonův charakterizační faktor	11,901	-
Specifická hustota média při 15,6°C	0,952 9	-
Tlak na výstupu pece	22	kPa
Teplota na vstupu pece	294,9	°C
Teplota na výstupu pece	416,3	°C
TBP destilační křivka při 100kPa:		
1%	256,8	°C
5%	371,4	°C
10%	388,8	°C
30%	456,6	°C
50%	517,7	°C
70%	615,4	°C
90%	753,3	°C
95%	786,1	°C
98%	803,4	°C

Tabulka 9: Tabulka výsledků 4. průmyslového případu

Výstupní data		
1. Střední molární hmotnost	453,21	g/mol
2. Parciální tlak uhlovodíku na výstupu pece	22	kPa
3. TBP destilační křivka média na výstupu		
1%	593,1	K
5%	714,4	K
10%	732,6	K
30%	803,0	K
50%	865,9	K
70%	965,1	K
90%	1 102,4	K
95%	1 134,5	K
99%	1 151,5	K
4. Procentuální objemový podíl odpařené fáze	4,18	% obj.
5. Průměrný bod varu odpařené fáze	561,1	K
6. Specifická hustota odpařeného média	0,843 1	-
7. Kritický tlak odpařené směsi	1 702,8	kPa
Kritická teplota odpařené směsi	737,8	K
8. Teplo potřebné na odpaření na průměrném bodu varu	54 837	J/mol
9. Teplo potřebné na odpaření při pracovních podmínkách	33 509	J/mol
10. Teplo pro ohřev média na výstupní teplotu	377,57	kJ/kg
11. Celkový výkon pece	17,149	MW

Tabulka 10: Tabulka výsledků 4. průmyslového případu získaných modifikovaným postupem výpočtu

Výstupní data		
1. Střední molární hmotnost	453,21	g/mol
2. Parciální tlak uhlovodíku na výstupu pece	22	kPa
3. TBP destilační křivka média na výstupu		
1%	471,1	K
5%	578,2	K
10%	594,6	K
30%	658,9	K
50%	717,7	K
70%	812,7	K
90%	949,4	K
95%	982,3	K
98%	999,8	K
4. Procentuální objemový podíl odpařené fáze	40,38%	% obj.
5. Průměrný bod varu odpařené fáze	696,4	K
6. Specifická hustota odpařeného média	0,906 0	-
7. Kritický tlak odpařené směsi	1 143,97	kPa
Kritická teplota odpařené směsi	857,4	K
8. Teplo potřebné na odpaření na průměrném bodu varu	76 560	J/mol
9. Teplo potřebné na odpaření při pracovních podmínkách	77 808	J/mol
10. Teplo pro ohřev média na výstupní teplotu	377,57	kJ/kg
11. Celkový výkon pece	20,134	MW

Ze srovnání výsledků z tabulky 9 a 10 je jasně zřejmé, že v tomto případě pece pro vakuovou destilaci ropy se jejímu jmenovitému tepelnému výkonu 18,928 MW (výsledek komerčního simulačního softwaru pro jmenovité provozní podmínky pece) se poněkud více blíží výsledek modifikovaného postupu (tabulka 10 - tepelný výkon pece vychází 20,134 MW) než výsledek původního znění nové metody (tabulka 9 - tepelný výkon pece vychází 17,149 MW).

4 Závěr a souhrnné zhodnocení výsledků

V předložené práci je (po úvodním seznámení s problematikou ohřevných trubkových pecí, jejich konstrukcí, základními typy a výpočty souvisejícími s jejich návrhem) představena nová alternativní metoda určení tepelného výkonu publikovaná v článku [7]. Během samotného zpracovávání alternativní metody, byla objevená drobná chyba vyskytující se v samotném článku [7] týkající se přepočtů jednotek tlaku, jež byla odstraněna. Následně byly provedeny zkušební výpočty. Z důvodů nedostačující přesnosti metody pro případy, v nichž se tlak na výstupu pece výrazně liší od běžných atmosférických podmínek, byla dle dostupné odborné literatury navržena vhodná modifikace této alternativní metody. Navržená modifikační úprava byla také následně zahrnuta do souhrnného blokového schématu postupu výpočtu. Oba variantní postupy byly následně zpracovány v programech Microsoft Excel 2010 a Octave verze 4.2.1, v nichž byly vytvořeny vhodné výpočtové nástroje. Jejich aplikací na zadané průmyslové případy byly následně získány hodnoty tepelného výkonu čtyř různých průmyslových trubkových ohřevných pecí. U průmyslových případů, kde původní metoda neposkytovala dostačující přesnost, byla pro srovnání aplikována i metoda modifikovaná. Souhrnný přehled vypočítaných hodnot tepelného výkonu je pro řešené průmyslové případy uveden v následující tabulce 11.

Tabulka 11: Tabulka reálných a vypočítaných hodnot tepelného výkonu [MW] zadaných průmyslových pecí

	Příklad 1 (atm. pec)	Příklad 2 (vak. pec)	Příklad 3 (atm. pec)	Příklad 4 (vak. pec)
Reálný stav (provoz – simul. data)	47,571	21,784	16,886	18,928
Alternativní metoda	47,697	16,097	16,962	17,149
Modifikovaná alt. metoda	-	22,810	-	20,134

Z výsledků z tabulky 11 je patrné, že pro případy pecí procesu atmosférické destilace ropy poskytuje alternativní metoda v původní podobě dle [7] (a po opravě chyb) skutečně dostatečně přesné výsledky. Avšak pro pece pro procesy vakuové destilace ropy je odchylka vypočtených hodnot oproti reálnému stavu značná a činí u druhého příkladu 26 % a u čtvrtého příkladu 10 %. Po aplikaci modifikované metody na tyto nevyhovující případy, došlo k lepšímu přiblížení k reálnému stavu, avšak rozdíl stále představuje 5÷7 % skutečného tepelného výkonu pece, a tak ani navrženou modifikací není dosaženo potřebné přesnosti jako u původní metody pro případy atmosférických pecí.

Z toho lze usuzovat, že metoda představená v [7] může být použita především ke stanovení tepelného výkonu trubkových pecí procesů atmosférické destilace ropy, ale není vhodná pro případy pecí pro ostatní technologické procesy zpracování ropy, zejména není vhodná pro stanovování tepelných výkonů pecí pro procesy vakuové destilace ropy. Zde je pak vhodnější použít navrženou modifikaci alternativní metody představenou v kapitole 2, která dává v těchto případech poněkud přesnější výsledky.

Na druhou stranu, k nesporným výhodám výše představené alternativní metody patří její jednoduchost a snadná aplikovatelnost bez potřeby použití drahých komerčních simulačních softwarů.

Tato metoda rovněž neklade vysoké nároky na množství vstupních data, jež patří do kategorie běžně dostupných provozních a zadávacích údajů a v případech procesů atmosférické destilace ropy může alternativní metoda posloužit jako naprosto rovnocenný výpočtový nástroj k výpočtu tepelného výkonu ohřevné trubkové pece.

5 Citovaná literatura

- [1] NEWNHAM, R.: Direct-Fired Heaters: A Practical Guide to their Design and Operation, Alberta: Kingsley Knowledge Publishing, 2012. 392 p. ISBN 978-1-926832-13-5
- [2] GARG, A., Optimize Fired Heater Operations to Save Money, Furnaces Improvements Services, 1997, 97-104
- [3] JETHVA, M.N. and BHAGCHANDANI, C. G., 2013, Fired Heater Design and Simulation, International Journal of Engineering Trends and Technology, 4 (2), pp. 159–164.
- [4] Oil and Gas Separator, Fired Heater Design, 2009,
Dostupné z <<http://www.oilngasseparator.info/oil-handling-surfacefacilities/heat-exchangers/fired-heater-design.html>>
- [5] Petro Tech, Radiant heating coils, Dostupné z < <http://heat-transfer-industrial-systems.com/industrial-heaters-furnaces/amine-reboilers/>>
- [6] Begginers Guide to Fired Heaters. Tulsa Heaters Midstream.
Dostupné z <[http://www.tulsaheatersmidstream.com/media/files/Begginers%20Guide%20to%20Fired%20Heaters%20\(rev00\).pdf](http://www.tulsaheatersmidstream.com/media/files/Begginers%20Guide%20to%20Fired%20Heaters%20(rev00).pdf)>
- [7] PLELLIS-TSALTAKIS, C., 2017, A shortcut procedure for calculation of process side heat duty of refinery fired heaters, Chemical Engineering Research and Design, 124, pp. 152–158.
- [8] RIAZI, M. R., Characterizations and Properties of Petroelum Fraction. 1st ed, Kuwait University, 2005, 427 p. ISBN 0-8031-3361-8

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
A_1	Koeficient pro rovnici 2.1.11	-
A_2	Koeficient pro rovnici 2.1.11	-
A_3	Koeficient pro rovnici 2.1.11	-
CIT	Teplota na vstupu pece	K
COT	Teplota na výstupu pece	K
EV	Procentuální objemový podíl odpařené fáze v médiu	% obj.
f	Korekční parametr pro rovnice 2.1.5 a 2.2.2	-
K_w	Watsonův charakterizační faktor	-
$M_{H/C}$	Molární tok uhlovodíkové směsi	kmol/h
M_{inerts}	Molární tok inertních podílů v médiu	kmol/h
MW	Střední molární hmotnost	g/mol
P	Tlak na výstupu pece	kPa
P_C	Kritický tlak	kPa
$P_{H/C}$	Parciální tlak média na výstupu pece	kPa
Q	Změna měrné entalpie Q absorbovaného média během ohřevu na výstupní teplotu	kJ/kg
R	Univerzální plynová konstanta	$Jmol^{-1}K^{-1}$
SG	Specifická hustota média, které bylo v peci odpařené	-
SG_{60}	Specifická hustota média při 60F (při 15,6°C)	-
T	Příslušný teplotní bod TBP destilační křivky při 100 kPa	K
T_B	Teplota průměrného bodu varu směsi	K
T_C	Kritická teplota	K
T_{EV}	Průměrný bod varu odpařené fáze	K
$T_{PH/C}$	Příslušný teplotní bod TBP destilační křivky při parciálním tlaku	K
$T_{C_{PH/C}}$	Příslušný teplotní bod TBP destilační křivky při parciálním tlaku upravené pro aromaticitu ropné frakce	K
X	Parametr pro rovnice 2.1.4 a 2.2.3	-
ΔH_V	Změna entalpie během odpařování při pracovních podmínkách	J/mol
ΔH_{VB}	Změna entalpie během odpařování na průměrném bodu varu	J/mol

Seznam příloh

Příloha 1

Zápis postupu výpočtu v programu Octave 4.2.1

Příloha 1: Zázpis postupu výpočtu v programu Octave 4.2.1

```
clear all, clc

%vstupní data
MF=375000; R=8.314; Tin=340+273.15; Tout=388.2+273.15; Kw=11.866; SG60=0.9490; Pout=16;
MOLinerts=0; T=[1 248.549;5 337.668;10 370.921;30 445.016;50 507.072;70 586.038;90 723.073;95
803.033;98 852.972]+[0 273.15];
A=0;%1 pro atmosférickou destilaci, 0 pro vakuovou destilaci

%krok 1 Střední molární hmotnost média MW
i=1;
while T(i,1)~=50
    i=i+1;
end
MW=-12272.6+9486.4*SG60+(8.37414-5.99166*SG60)*T(i,2)+(1-0.77084*SG60-
0.02058*SG60^2)*(0.7465-222.466/T(i,2))*10^7/T(i,2)+(1-0.80882*SG60-
0.02226*SG60^2)*(0.32284-17.3354/T(i,2))*10^12/(T(i,2)^3);

%krok 2 Parciální tlak na výstupu Phc
MOLhc=MF/MW;% Molární tok uhlovodíku
Phc=Pout*MOLhc/(MOLhc+MOLinerts);

%krok 3 Přepočet TBP destilační křivky při 100 kPa na parciální tlak TCphc
X=(5.994296-0.972546*log10(7.50061683*Phc))/(2663.129-95.76*log10(7.50061683*Phc));
Tphc=T;
TCphc=T;
f=T;
if A>0;
    for i=1:size(T)(1);
        Tphc(i,2)=748.1*X*T(i,2)/(1+T(i,2)*(0.3861*X-0.00051606));
        if Tphc(i,2)<366;
            f(i,2)=0;
        elseif 477<Tphc(i,2);
            f(i,2)=1;
        else
            f(i,2)=(Tphc(i,2)-366)/111;
        end
        TCphc(i,2)=Tphc(i,2)+1.389*f(i,2)*(Kw-12)*(log10(7.50061683*Phc)-2.8808);
    end
else
    for i=1:size(T)(1);
        if T(i,2)<367;
            f(i,2)=0;
        elseif 478<T(i,2);
```

```

    f(i,2)=-3.2985+0.009*T(i,2);
else
    f(i,2)=-3.2985+0.009*T(i,2);
end
Tphc(i,2)=T(i,2)-1.3889*f(i,2)*(Kw-12)*log10(7.50061683*Phc/760);
TCphc(i,2)=Tphc(i,2)/(748.1*X-Tphc(i,2)*(0.3861*X-0.00051606));
end
end

%krok 4 Procentuální podíl odpařené fáze EV
i=1;
while Tout>TCphc(i,2)
    i=i+1;
end
i=i-1;
EV=TCphc(i,1)+(TCphc(i+1,1)-TCphc(i,1))*(Tout-TCphc(i,2))/(TCphc(i+1,2)-TCphc(i,2));

%krok 5 Průměrný bod varu odpařené části média Tev
i=1;
while EV/2>T(i,1)
    i=i+1;
end
i=i-1;
Tev=T(i,2)+(T(i+1,2)-T(i,2))*(EV/2-T(i,1))/(T(i+1,1)-T(i,1));

%krok 6 Měrná hmotnost odpařeného média
SG=(1.8*Tev)^(1/3)/Kw;

%krok 7 Kritický tlak a kritická teplota odpařené části média
lnPc=17.2019-0.0566/SG-(0.43632+4.12164/SG+0.213426/(SG^2))*10^(-
3)*Tev+(4.75794+11.81952/SG+1.5301548/(SG^2))*10^(-7)*Tev^2-(2.4505+9.9/(SG^2))*10^(-
10)*Tev^3;
Pc=e^lnPc/1000;
Tc=189.83+450.56*SG+(0.4244+0.1174*SG)*Tev+(0.1441-1.0069*SG)*10^5/Tev;

%krok 8 Teplo absorbované během odpařování na průměrném bodu varu Hvb
Hvb=1.093*R*Tev*(log(Pc/100)-1.013)/(0.93-Tev/Tc);

%krok 9 Teplo absorbované během odpařování při pracovních podmínkách Hv
Hv=Hvb*((1-Tout/Tc)/(1-Tev/Tc))^0.38;

%krok 10 Teplo absorbované médiem během ohřevu na výstupní teplotu Q
A1=0.055*Kw+0.35;
A2=0.6811-0.308*SG60;
A3=0.000815-0.000306*SG60;
Q=2.3263*(A1*A2*(1.8*Tout-459.688)+A1*A3*(1.8*Tout-459.688)^2/2-A1*A2*(1.8*Tin-459.688)-
A1*A3*(1.8*Tin-459.688)^2/2);

```

%krok 11 Celkové absorbované teplo H, Tepelný výkon Qcelk

H1=Hv*MOLhc*EV/100;

H2=Q*MF;

H=H1+H2;

Qcelk=H/3600000;

%Výpis výsledků

```
fprintf('Stredni molarni hmotnost media, [g/mol]: %d\nParcialni tlak na vystupu, [kPa]: %d\nTBP
krivka pro parcialni tlak, [K]: \n %d  %d\n %d  %d\n %d  %d\n %d  %d\n %d  %d\n
%d  %d\n %d  %d\n %d  %d\nProcentualni podil odparene faze: %d\nPrumerny bod varu
odparene casti media [K]: %d\nMerna hmotnost odpareneho media [-]: %d\nKriticky tlak [kPa]:
%d\nKriticka teplota [K]: %d\nTeplo absorbovane odparenim na prumernem bodu varu [j/mol]:
%d\nTeplo absorbovane odparenim pri pracovnich podminkach [j/mol]: %d\nTeplo pro ohrev media
na vystupni teplotu [kj/kg]: %d\nCelkovy tepelny vykon pece [MW]:
%d\n',MW,Phc,TCphc(1,1),TCphc(1,2),TCphc(2,1),TCphc(2,2),TCphc(3,1),TCphc(3,2),TCphc(4,1),TCphc
(4,2),TCphc(5,1),TCphc(5,2),TCphc(6,1),TCphc(6,2),TCphc(7,1),TCphc(7,2),TCphc(8,1),TCphc(8,2),TCph
c(9,1),TCphc(9,2),EV,Tev,SG,Pc,Tc,Hvb,Hv,Q,Qcelk)
```