



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

APLIKACE VBA (VISUAL BASIC FOR APPLICATION) A MAPLE NA PROBLÉMY PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ

VBA AND MAPLE APPLICATION IN PROCESS ENGINEERING PROBLEMATICS.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. DANIEL FARKAČ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. JOSEF KOHOUTEK, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Daniel Farkač

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Procesní inženýrství (3909T003)**

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

Aplikace VBA (Visual Basic for Application) a Maple na problémy procesního inženýrství

v anglickém jazyce:

VBA and Maple application in process engineering problematics.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

VBA a Maple při řešení různých dílčích úkolů v oblasti procesního inženýrství může používat i inženýr bez specializace programování nebo informatiky. Dosahuje se tak racionalizace projekčních prací a optimalizace řešení řady problémů.

Cíle diplomové práce:

Ukázat, že softwarovými prostředky, které jsou běžně na většině počítačů (Excel-VBA) lze řešit úspěšně inženýrské úlohy, od automatizace rutinních operací až po nalezení optimálních řešení.

Seznam odborné literatury:

1. Manuály pro práci s Maple a VBA.
2. Odborná literatura a učebnice chemického inženýrství.
3. Internet

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Josef Kohoutek, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 25.11.2008

L.S.

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

Anotace

Úkolem diplomové práce Aplikace Visual Basicu a Maple na problémy procesního inženýrství je ukázat možnosti použití těchto programovacích jazyků pro různé inženýrské úlohy. Zejména programovací jazyk Visual Basic for Application (VBA), který je součástí kancelářského balíku MS Office, je v praxi používán velmi málo. Proto je v této práci na doporučení vedoucího práce prof. Ing. Josefa Kohoutka, CSc. řešena komplexní úloha z oblasti návrhu procesních pecí. Konkrétně se jedná o řešení výpočtu přestupu tepla a optimalizaci výšky zvětšených povrchů trubek v konvekční sekci procesních pecí. Celá úloha je zpracována ve VBA a je spouštěna v Excelu. Vytvořený program po zadání vstupních informací jednak vypočte rozměry a tepelný výkon konvekční části pece, ale může také zoptimalizovat výšku zvětšených povrchů v různých částech konvekce a tím minimalizovat investiční náklady.

Annotation

The task of the diploma thesis named VBA and Maple Application on Process Engineering Problems is to show the possibilities of using these programming languages for various engineering tasks. Particularly the programming language Visual Basic for Application (VBA), which is a part of MS Office package, is very little used in practise. That's why this thesis solves the complex task of a furnaces design process; the topic was recommended by the supervisor prof. Ing. Josef Kohoutek, CSc. Specifically, the thesis deals with calculations of heat transfer and optimization of the height of extended surfaces of tubes in the convection section of process furnaces. The entire task is elaborated in VBA and runs in Excel. After entering the input information, the created program first calculates the size and heat output of the convection section, but it can also optimize the height of extended surfaces in different parts of the convection section and thus minimize investment costs.

Klíčová slova

Visual Basic for Application, MS Excel, Procesní pece, Ohřevné pece, Radiační sekce, Konvekční sekce, Vertikální válcová pec, Šachtová pec, Ofukovač sazí, Zvětšené povrchy, Trnované trubky, Žebrované trubky, Rovnice přenosu tepla, Součinitel přestupu tepla, Bilanční rovnice, Optimalizace.

Key words

Visual Basic for Application, MS Excel, Process furnaces, Fired heaters, Radiant section, Convection section, Vertical cylindrical furnace, Cabin furnace, Soot blower, Extended surfaces, Studded tubes, Finned tubes, Heat transfer equation, Heat transfer coefficient, Balance equation, Optimization.

Bibliografická citace

FARKAČ, D. *Aplikace VBA (Visual Basic for Application) a Maple na problémy procesního inženýrství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 56 s a 14 s příloh. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Josef Kohoutek, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním autorským dílem, které jsem vypracoval samostatně.

Poděkování

Dovoluji si touto cestou poděkovat prof. Ing. Josefu Kohoutkovi, CSc z Ústavu procesního a ekologického inženýrství za poskytnuté konzultace a odbornou pomoc.

Obsah

Obsah	1
Úvod	3
Visual Basic for Application	4
Základní definice Visual Basicu	4
Výhody propojení Excelu a VBA	5
Procesní pece	6
Princip činnosti pecí	6
Rozdělení pecí	6
Podle způsobu sdílení tepla	6
Podle konstrukčního uspořádání	6
Návrh pece	9
Radiační sekce	9
Návrh radiační sekce	9
Konvekční sekce	9
Teplosměnný povrch trubek	10
Stínící sekce	10
Trubky s hladkým povrchem	10
Zvětšené povrchy trubek	10
Trnované trubky	10
Žebrované trubky	12
Dispoziční řešení konvekční sekce	13
Čistění konvekčních sekcí	15
Návrh konvekční sekce	15
Uspořádání konvekční sekce	16
Obecný postup při návrhu konvekční sekce pecí	16
Vzorce a výpočtové postupy	18
Rychlost spalin G_c	18
Volba rychlosti spalin	19
Výkon konvekční sekce	20
Teplu předané ve stínící sekci Q_s	21
Rovnice celkového přenosu tepla	21
Celkový součinitel prostupu tepla U	22
Součinitel přestupu tepla uvnitř trubek h_i	23
Součinitel přestupu tepla vně trubek (na straně spalin) h_o	24
Pro hladké trubky:	24
Součinitel přestupu tepla na straně spalin h_o pro zvětšené povrchy	25
Výpočet maximální teploty materiálu trubek	26
Výpočet maximální teploty konců trnů nebo žeber T_t	28
Upravené rovnice přestupu tepla	28
Komín	29
Konstrukční typy a druhy uspořádání	29
Průměr komínu	30
Program pro návrh konvekční sekce procesních pecí	31
Program pro návrh konvekční sekce procesních pecí	31
Celková koncepce programu	31
Manuál k použití programu	31
Formulář první – Parametry pece	32
Formulář druhý – Ohřívaná media	33

Formulář třetí – Uspořádání konvekční sekce.....	34
Formulář čtvrtý – Konstrukční parametry sekce konvekce.....	36
Výpočtové a optimalizační procedury	37
Určení rozměrů sekce v konvekci	38
Iterační výpočet předaného tepla.....	38
Optimalizace výšky zvětšených povrchů	40
Výpis výsledků do sešitu v Excelu.....	42
Určení ceny materiálu.....	42
Ověřovací příklad	43
Závěr.....	45
Seznam použité literatury	46
Seznam použitých symbolů	47
Seznam příloh.....	49

Úvod

Diplomová práce Aplikace Visual Basicu a Maple na problémy procesního inženýrství má za cíl ukázat použitelnost běžně dostupného kancelářského softwaru na různé inženýrské úlohy. Jedná se především o ukázkou využití často opomíjeného programovacího jazyku Visual Basic for Application (VBA), který je součástí kancelářského balíku MS Office. Díky rozšířenosti sady Office je VBA dostupný téměř na každém počítači a přesto většina běžných uživatelů nemá o existenci podobného programu tušení. Přitom je použití tohoto jazyka poměrně snadné, zvláště v kombinaci s programem MS Excel. Použitím Excelu lze dosáhnout značného zmenšení výpočtové náročnosti určité úlohy. Pokud je navíc daná úloha zpracována ve VBA, stává se výpočet přehlednějším, a to nejen pro autora, ale i pro ostatní uživatele. Vzniklý program pak lze používat jako kterýkoli jiný softwarový doplněk určený k řešení problému. Řešení problému ve VBA navíc dává více prostoru k využití cyklů a díky tomu je možné řešit náročnější problémy vyžadující iterační výpočty nebo optimalizaci. Pokud tedy není pro určitou úlohu k dispozici specializovaný softwarový balík, je její řešení pomocí VBA poměrně výhodné, zvláště v případě opakování řešení stejné úlohy.

V této diplomové práci je pomocí VBA řešena komplexní úloha v oboru návrhu procesních pecí, která byla vybrána na doporučení vedoucího práce prof. Ing. Josefa Kohoutka, CSc. Konkrétně se jedná o řešení výpočtu prostupu tepla a optimalizaci výšky zvětšených povrchů trubek v konvekční sekci procesních pecí. K řešení daného problému je použit Visual Basic for Application v propojení s Excelem; software Maple byl využíván pouze v průběhu programování k dílčím úkonům jako jsou úpravy a řešení rovnic apod.

Výsledkem této práce je počítačový program spustitelný v rozhraní MS Excel, který obsahuje formuláře k zadávání vstupních dat pro výpočet, procedury pro stanovení geometrických parametrů konvekční části pece, bilanční iterační proceduru k určení předaného tepla, proceduru určenou k optimalizaci výšky zvětšených povrchů a výpisový modul, který vkládá výsledky do sešitu v Excelu. Tento program tedy pokrývá tu část návrhu konvekční sekce, která se zabývá určením potřebného počtu řad trubek, volbou vhodných zvětšených povrchů a volbou výšky zvětšeného povrchu pro jednotlivé části konvekční sekce. Výhodou programu je, že při změně každého z volených parametrů se okamžitě zobrazí nejdůležitější z vypočtených dat. Díky tomu je možné snadno ověřit správnost a vhodnost právě zadaného parametru. Samotná optimalizace pak umožňuje zvolit cenově nejvýhodnější kombinaci počtu řad trubek a výšky zvětšených povrchů a to pro všechny sekce v konvekci.

Visual Basic for Application

Microsoft Office je univerzální balík kancelářských aplikací pro široké použití. Integrovanou součástí MS Office je Visual Basic for Application (VBA). Tento objektově orientovaný programovací jazyk slouží k tvorbě maker, která rozšiřují a doplňují možnosti sady Office o další funkce i o úplně nové aplikace. Microsoft Office Excel 2003 je obecný, univerzální tabulkový kalkulátor, který slouží k organizaci dat, k výpočtům na základě těchto dat a k jejich analýze. Nejčastěji je VBA používán právě jako doplněk MS Excelu, protože umožňuje snadný vývoj aplikací založených na tabulkovém procesoru.

V Excelu lze provádět nejrůznější úkony počínaje jednoduchou organizací dat do tabulek a vykreslování grafů, přes interakce buněk pomocí základních matematických operací, až po rozsáhlé výpočty v rozsahu několika listů s využitím předdefinovaných matematických, statistických, finančních i jiných funkcí. Pomocí VBA pak lze definovat nové funkce pro specifické využití v určitém oboru (např. ve strojírenství). Tyto funkce je v jejich nejzákladnější podobě možné spouštět v listech Excelu obdobným způsobem jako funkce předdefinované. Pro složitější výpočty, které vyžadují větší objem zadaných dat a dávají větší množství výsledných dat, je výhodnější použít sofistikovanější makra. Jednou cestou je vytvořit makro, které načte vstupy z listu, provede požadovaný výpočet a do příslušných buněk zapíše výsledky. Tato metoda je z programátorského hlediska jednodušší, avšak při větším rozsahu výpočtů může být pro uživatele značně matoucí. Druhou cestou je vytvořit vlastní formuláře, do kterých jsou vstupní data zadávána nezávisle na sešitech a kde jsou po zvolení všech parametrů výpočtu zobrazeny i výsledky. Pro uživatele je používání formulářů přehlednější, ale k dosažení určitého komfortu při práci s programem je třeba mnohem většího úsilí programátora. Optimální je propojit použití listů a formulářů a využít tak výhody obojího.

Základní definice Visual Basicu

Visual Basic for Application je objektově orientovaný programovací jazyk. Každá programovatelná součást Excelu je považována za objekt. Objekt je tedy například list, graf, sloupec, ale i ovládací prvek listu nebo formuláře (např. tlačítko). Dále mezi objekty patří ohraničení buněk, font použitý v buňce, ale také dialogové okno pro načtení souboru. Objekty jsou seřazeny podle určité hierarchie. Nejvyšší objekt je aplikace (Application). Pod aplikaci spadají další objekty, například sešity, pracovní listy, okna apod. Pod nimi jsou opět objekty – tak například pod pracovní list spadá objekt adresa (buňky). Avšak stejně jako může mít jeden objekt více objektů pod sebou, tak může mít i více objektů nad sebou. V případě objektu adresa jsou pod ním objekty jako font, hranice buňky, komentář; nad ním může být list, sloupec, řádek apod. Pod adresu může dokonce v určitém případě spadat opět adresa. První “adresa” označuje určitou oblast v sešitu, druhá “adresa” označuje určitou buňku v této oblasti. Pro usnadnění orientace je v nápovědě k VBA obsažen kompletní objektový model Excelu [1].

Každý objekt má určité vlastnosti (properties) a metody (methods), pomocí nichž lze s objektem manipulovat. Vlastnosti jsou parametry objektu (např. nadpis grafu objektu graf), které lze měnit. Vlastnost musí mít vždy určitou hodnotu; některé vlastnosti jsou pouze pro čtení, jiné lze měnit. Určité objekty mají některé vlastnosti společné. Například viditelnost (visible) je vlastnost, kterou lze nastavit u většiny objektů (grafy, listy, formuláře apod.). Hodnota, kterou lze nastavit vlastnost viditelnosti, je typu boolean - tedy pravda nebo nepravda. Jiným vlastnostem lze nastavit jiné hodnoty určené jejich datovými typy.

Metody slouží k provedení určité jednorázové akce s objektem. Metody jsou opět pro určité objekty společné. Mezi nejběžnější metody patří kopírování (copy) a vkládání (paste). Například při kopírování objektu adresa se přenesou všechny vlastnosti z jedné buňky na

druhou. Tím lze prakticky nastavit velké množství vlastností najednou a navíc se změní i vlastnosti objektů spadajících pod objekt adresa. Jiným typem metody je vkládání nových objektů metodou add. Do objektu tzv. "kolekce objektů" je přidán další; je mu přiřazeno jméno a všechny ostatní vlastnosti. Vkládat lze listy, grafy, sloupce a řádky listů, formuláře, ovládací prvky formulářů a další.

Programování ve VBA tedy převážně sestává z manipulace s objekty nastavováním jejich vlastností a používáním jejich metod. Sestavením uceleného souboru příkazů k dosažení určitého cíle vzniká procedura. Ke spuštění procedur jsou použity události. Události reagují na určitou akci uživatele právě spuštěním procedury k události přiřazené. Téměř všechny události jsou vázány k objektům, avšak ne všechny objekty mají své události. Objekty, ke kterým náleží události, jsou sešity, listy, formuláře a jejich prvky, grafy a samotná aplikace. Typické události, které k nim náleží, jsou otevření sešitu, změna vybraných buněk v listu, kliknutí ve formuláři a kliknutí na tlačítko. Většina akcí uživatele je zmapována událostmi. Událostí je i pohyb myši (přes určitý objekt), změna obsahu objektu (buňky), dvojklik, stisknutí klávesy a zavření formuláře nebo sešitu [1].

Výhody propojení Excelu a VBA

MS Excel má kompaktní strukturu souboru. V Excelu je možné umístit do jednoho souboru neomezené množství listů, listů s grafy, formulářů a VBA modulů. To značně usnadňuje práci programátora, protože nehrozí ztráta důležitých částí programu. Formuláře a moduly jsou přitom pro běžné uživatele neviditelné.

Díky integraci VBA do Excelu je možné nejen spouštět makra s novými procedurami, ale také využívat procedury a další nástroje zabudované v samotném Excelu. Obecně platí, že jakýkoli nástroj, který uživatel používá a jakýkoli objekt, s kterým manipuluje, lze ovládat i pomocí makra. Programátorům amatérům se navíc velmi hodí funkce Záznam makra, což je program, který sleduje akce provedené v sešitu a převádí je do kódu VBA.

Pro výpočet jednodušších vztahů lze ve VBA naprogramovat funkci, která se bude spouštět stejně jako předdefinované funkce Excelu. Programátorsky je to velmi snadná úloha, protože stačí napsat příslušné vztahy do zdrojového kódu, vstupní proměnné nadefinovat jako vstupy funkce a výsledek přiřadit samotné funkci. Odpadá tedy problém s vkládáním dat a výpisem výsledku. Koncový uživatel pak funkci nalezne mezi ostatními funkcemi Excelu. Nevýhodou je velmi obtížné použití těchto funkcí pro vypsání více výsledků.

Excel umožňuje snadno přidávat ovládací prvky jako jsou tlačítka, seznamy a přepínače do listů. Díky tomu, že jsou tyto prvky snadno programovatelné, je úprava listů pomocí makra dostupná širšímu spektru uživatelů. Velmi snadná je také úprava a tvorba panelů nástrojů, jak přímo, tak i pomocí maker. Lze upravit i kontextové menu pro pravé tlačítko myši [1]. Tak si každý uživatel může přizpůsobit své pracovní prostředí.

Procesní pece

Pece jsou procesní zařízení používaná pro ohřev procesních médií, jako je například reakční směs před vstupem do reaktoru nebo ropa při atmosférické destilaci. V pecích se používají plynná paliva (zejména zemní plyn) a paliva kapalná (těžší ropné frakce).

Princip činnosti pecí

Procesní pece ohřívají požadované medium kombinací radiačního a konvekčního sdílení tepla. Teplo je vyvíjeno spalováním paliva v hořácích, kde dochází k smísení paliva se spalovacím vzduchem a směs je pak vháněna do radiační sekce pece pod tlakem nebo přirozeně odtahem spalin. V radiační sekci pece probíhá sdílení tepla hlavně radiací, konvekce se uplatňuje omezeně cirkulací spalin. Trubkový had s ohřivaným médiem je osaláván plamenem z hořáků a horkými spalinami. Ty pak odchází do konvekční sekce pece, kde prochází mezi řadami trubek, čímž dochází ke konvektivnímu přestupu tepla. Radiace se v konvekční sekci uplatňuje pouze v malé míře. Zatímco v radiační části pece jsou pouze hladké trubky, v konvekční sekci lze použít zvětšené povrchy trubek za účelem zlepšení přestupu tepla na straně spalin. Spaliny odchází z konvekční sekce spalinovodem, a to buď k dalšímu využití tepla (předehřev spalovacího vzduchu) nebo do komína. Ohřívané látky prochází pecí zpravidla v opačném směru než spaliny, čímž je dosaženo protiproudu a vyšší účinnosti pece.

Rozdělení pecí

Podle způsobu sdílení tepla

Podle způsobu sdílení tepla lze pece rozdělit na převážně konvekční, převážně radiační a radiačně konvekční.

V radiačně konvekční peci je teplo nejprve předáváno sáláním v radiační sekci a odtud pak spaliny odchází do konvekční sekce, kde odevzdají zbytek využitelného tepla. Tento typ pecí je využíván nejčastěji, protože je dosaženo vysokého využití tepla, a tím i nízkých provozních nákladů při odpovídajících investičních nákladech.

Radiační pece se vyrábí bez konvekční části pece z důvodu úspory investičních nákladů. Teplo se předává pouze v radiační komoře. Tyto pece se vyznačují malou účinností, protože spaliny opouštějí pec při vysoké teplotě. Proto se radiační pece používají pouze pro malé výkony (do 3 MW).

Konvekční pece jsou určeny pro ohřev látek, které vyžadují stabilní přísun tepla (výkyvy teplot by mohly ohřivanou látku znehodnotit). V těchto pecích je palivo spalováno v horizontální komoře, odkud spaliny odchází okolo štítové zdi do konvekční sekce. Teprve zde spaliny odevzdávají teplo. Toto uspořádání je výhodné, protože v konvekční sekci pece nedochází k nepravidelnému rozdělení tepla mezi jednotlivé trubky a ohřev je tak plynulý. Je také snazší regulovat teplotu ohřívaného média. Tyto pece musí mít mnoho řad trubek v konvekční části, protože konvektivní přestup tepla není tak účinný jako radiační. Nevýhodou pak je vysoká pořizovací cena i provozní náklady (vlivem tlakových ztrát).

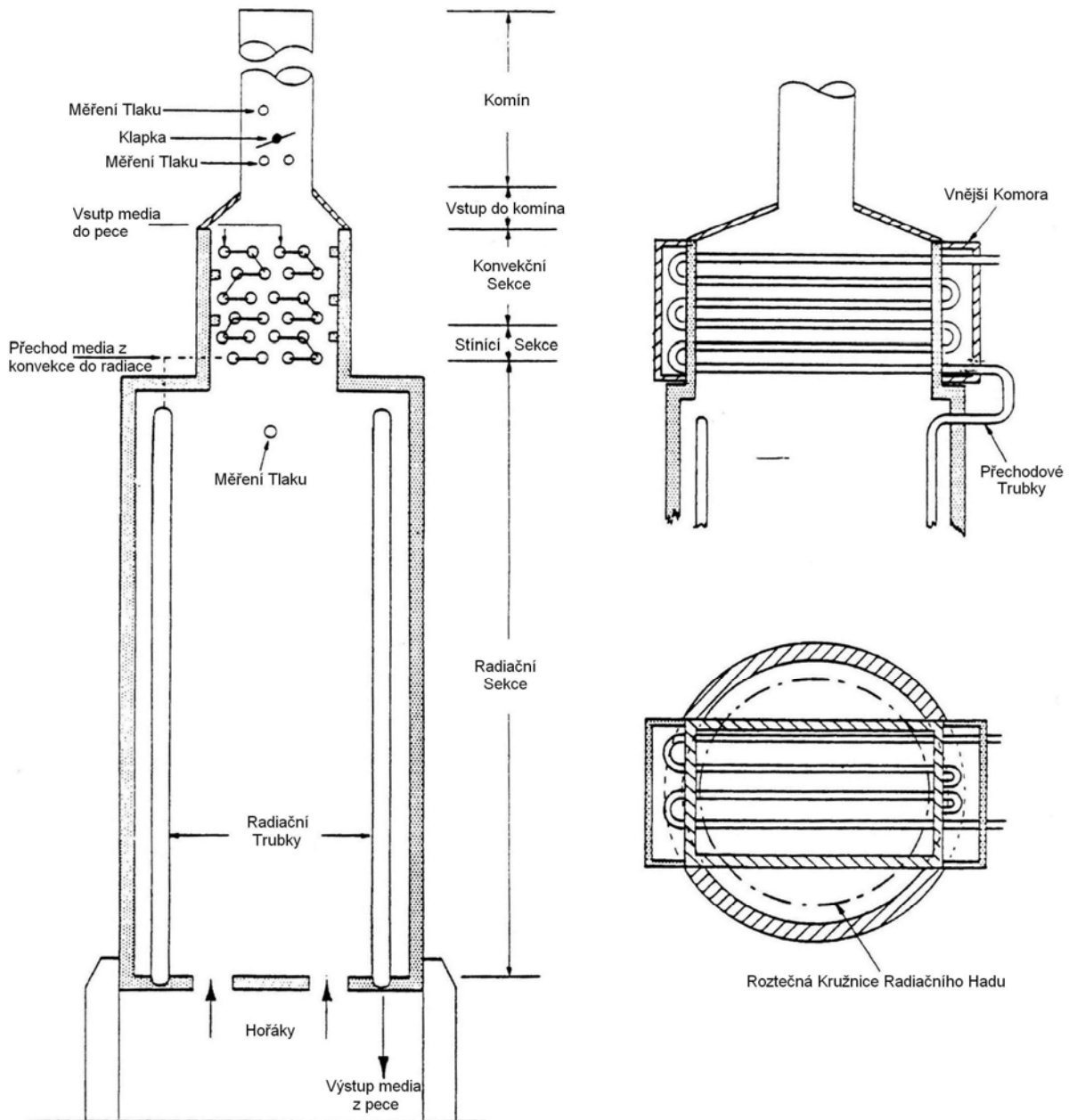
Podle konstrukčního uspořádání

Dále lze pece rozdělit podle konstrukčního uspořádání hořáků a uspořádání trubek v radiační sekci. V pecích s hořáky ve stěně jdou plameny vodorovně a konvekční sekce je vedle sekce radiační, pec je tedy horizontální. V pecích s podlahovými hořáky jdou plameny vzhůru a konvekční sekce je nad sekci radiační, pec je vertikální. Horizontální pece jsou válcové, s vodorovným trubkovým hadem. Mezi vertikální pece patří válcové, které mají

svislý trubkový had nebo trubky ve šroubovici, šachtové pece s vodorovným trubkovým hadem nebo spirálovým trubkovým systémem, a další typy pecí.

Vertikální válcové pece tvoří válcová radiační komora, kde jsou uprostřed v podlaze pece hořáky a po obvodu jsou trubky s ohříváním médiem. Běžně se používá trubkový systém s vertikálními trubkami, které mají na koncích komory kolena (Obr. 1). Další možností jsou horizontální trubky, které jsou skrouženy do šroubovice [5].

Nad radiační sekci je konvekční sekce s horizontálními trubkami (Obr. 1). První dvě řady trubek jsou tzv. stínící trubky, které kromě konvektivního přestupu tepla ze spalin zachycují tepelné záření z radiační sekce. Tyto trubky jsou vždy bez zvětšených povrchů, aby se zabránilo překročení dovolené teploty materiálu. Další řady trubek v konvekční sekci mohou mít zvětšené povrchy. Vertikální trubkový systém se dnes nepoužívá, tento typ konvekčních sekci byl u starých pecí, kde zpravidla trubky z konvekční sekce přecházely do sekce radiační. Jednou z nevýhod bylo, že tento systém znemožňoval čištění trubek.

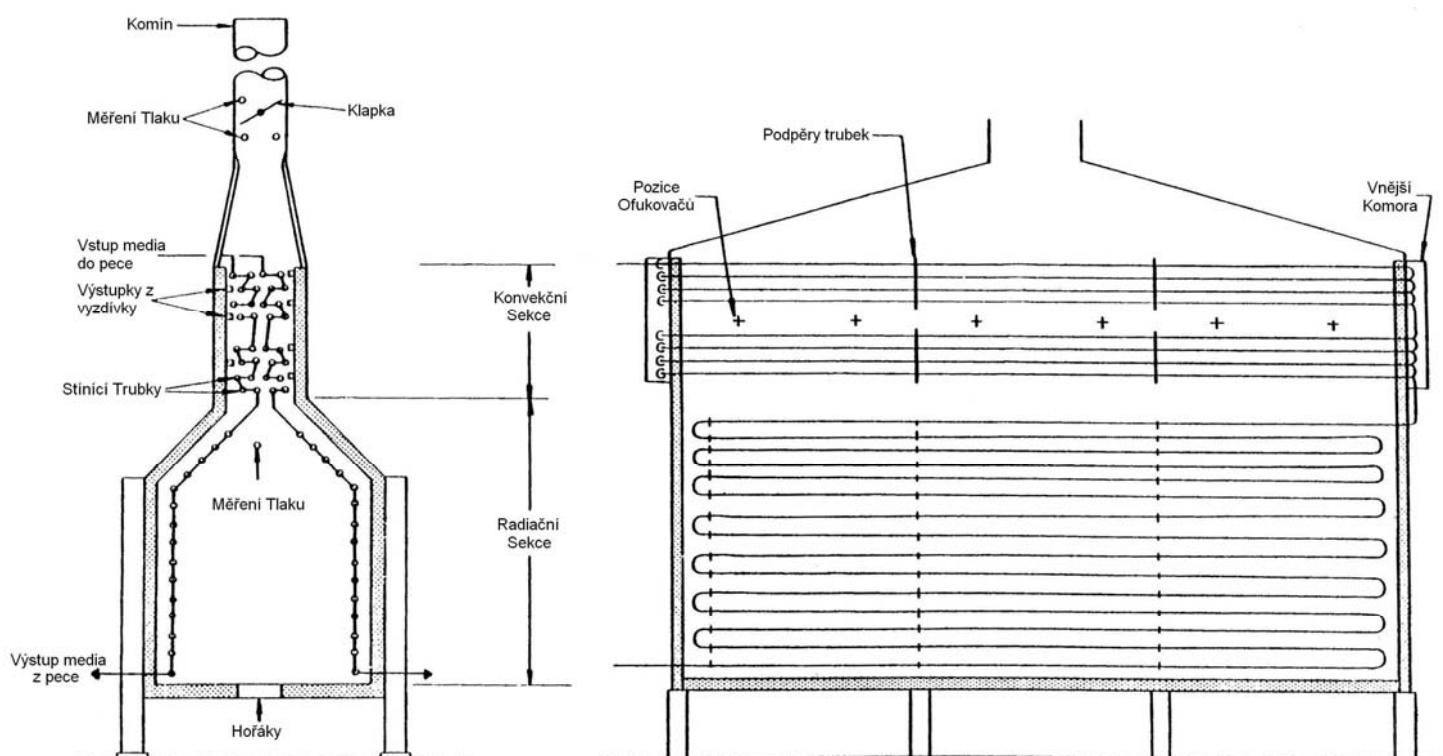


Obr. 1 Schéma vertikální válcové pece

Z konvekční části pece jsou spaliny odváděny do komína umístěného zpravidla přímo nad pecí (případně se používají k předeřevu spalovacího vzduchu spaliny). Výhodou vertikálních válcových pecí je malá zastavěná plocha a větší účinnost, než mají šachtové pece. Používají se pro malé a střední výkony [5].

Šachtová pec má radiační komoru obdélníkového půdorysu. Uprostřed pece je v podélném směru umístěna řada podlahových hořáků. U podélných stěn je trubkový systém s horizontálními trubkami a vratnými koleny na obou koncích pece (Obr. 2). Trubkový had pokračuje i na stropu pece až k odtahům do konvekční sekce. Na kratších stěnách pece trubky nejsou. Jinou možností je umístit trubky po celém obvodu pece ve spirálovém radiačním hadu. Tímto novějším řešením je možné dosáhnout snížení tlakových ztrát, plynulejšího ohřevu media a dalších výhod [5]. Existuje i další typ pece s vertikálním trubkovým hadem. Při tomto uspořádání jsou trubky jednak okolo stěn komory, a jednak i mezi jednotlivými hořáky. Trubky mezi hořáky jsou ozařovány z obou stran a dostávají tak zhruba o 50% více tepla než trubky podle stěn. Výhodou těchto pecí je výrazná úspora objemu radiační sekce, je však třeba správně rozvrhnout průchod media trubkovým systémem, aby nedocházelo k nerovnoměrnému ohřevu trubek i media.

Z radiační sekce spaliny odchází do standardní horizontální konvekční sekce, která je opět umístěna nad radiační sekci. Odtud vychází odtah spalin do komína nebo k předeřevu spalovacího vzduchu spaliny. Pro velké výkony je možné postavit více radiačních komor vedle sebe, konvekční sekce bývá společná. Šachtové pece se používají pro střední a velké výkony; jejich nevýhoda spočívá ve velké zastavěné ploše.



Obr. 2 Schéma šachtové pece

Horizontální válcová pec je tvořena válcovou radiační sekci s hořáky umístěnými na čelní stěně válce poblíž dna pece. Horizontální trubkový had je umístěn v horní části radiační komory po obvodu válce. Naproti hořákům je dělicí příčka zvaná bridgewall oddělující radiační sekci od sekce konvekční, která je umístěna vedle radiační sekce. Konvekční sekce je standardního typu s horizontálním svazkem trubek. Větší pece mají dvě radiační komory a konvekční sekce je umístěna mezi nimi. Avšak toto uspořádání znemožňuje čištění konvekce

ofukovači sazí. Tato pec je dnes již zastaralá a nepoužívá se, protože vyžaduje velké investiční náklady.

Návrh pece

Procesní pec se do procesu zařadí v případě, že není k dispozici dostatek tepla z jiných zdrojů (media, které je třeba dochladiť na určitou teplotu, topná pára apod.). Návrh pece tedy probíhá až po dokončení návrhu výměňkové sítě. V této fázi je z požadavků procesu známo, která media bude třeba ohřívat, dále množství a parametry jednotlivých medií, a především vstupní a požadované výstupní teploty medií. Dalším krokem je volba paliva, zpravidla podle dostupnosti a ceny, a volba typu pece s ohledem na výkon a zastavěnou plochu.

Následuje volba komínové teploty podle požadavků procesu nebo s ohledem na rosný bod spalin. Z tepelné bilance celé pece se určí množství spalin a spotřeba paliva (na základě požadovaného tepelného výkonu, složení a výhřevnosti paliva a přebytku spalovacího vzduchu).

V dalším kroku se výkon pece rozdělí mezi radiační a konvekční sekci a pokračuje se analýzou radiační sekce pece a optimalizací sekce konvekční, případně i optimalizací předehřevu vzduchu, pokud bude použit.

Po dokončení optimalizace pece se přistoupí k detailnímu návrhu, který zahrnuje pevnostní výpočty, tepelné a hydraulické simulace, detailní návrhy systému čištění úsad apod.

Radiační sekce

Radiační komora je základní část každé pece. Typ pece je v podstatě dán typem radiační komory. Konstrukce a rozměry radiační komory tedy udávají výkon i další vlastnosti pece.

V radiační sekci probíhá hoření paliva vstříkovaného do prostoru pece z hořáků. Žár z plamenů a horkých spalin se předává trubkovému svazku umístěnému podél stěn pece. Kromě toho přechází sáláním na vnější stranu trubek teplo absorbované vyzdívkou. Malé množství tepla se předá konvekcí při cirkulaci spalin, a to hlavně v horní části komory. Spaliny pak odchází do konvekce.

Návrh radiační sekce

Předběžný návrh radiační sekce lze vypracovat podle několika základních parametrů. Patří mezi ně tepelný tok absorbovaný médiem, tepelný tok získaný spalováním paliva, plocha ozařovaného povrchu trubek, maximální tepelné zatížení vnějšího povrchu radiačních trubek a jízková teplota. Tepelný tok absorbovaný médiem určuje, kolik tepla bude odváděno v radiační sekci. Tepelný tok získaný spalováním paliva je znám z podmínek spalování. Plocha ozařovaného povrchu trubek je závislá na průměru trubek, který je dán množstvím ohřívaného media. Dále pak závisí na délce trubek a jejich počtu. Jelikož je rozteč trubek dána rozměry kolen, je počtem a průměrem trubek určen i rozměr pece. Maximální tepelné zatížení vnějšího povrchu radiačních trubek je dáno buď požadavky ohřívaného media nebo materiálem trubek [5].

Optimalizací poměru délky a počtu trubek a optimalizací poměru celkového požadovaného absorbovaného tepelného toku ku tepelnému toku absorbovanému v radiaci jsou získány všechny parametry, podle kterých lze vypočítat předběžné uspořádání radiační sekce. K detailnímu návrhu lze přikročit až po předběžném návrhu konvekční sekce a komínu.

Konvekční sekce

Spaliny vystupující z radiační sekce trubkových pecí jsou vedeny do konvekční sekce a teprve odtud odchází do komína. Konvektivního přestupu tepla se využívá, protože sdílení tepla radiací ze spalin o teplotě pod 850°C je relativně neekonomické. Proto se většina pecí

staví s tzv. konvekčními sekcemi. V konvekčních sekcích se zvětšenými povrchy se předává 30 až 35 % z celkového absorbovaného tepla v peci. Konvekční sekce musí být navržena tak, aby se teplo procesnímu mediu předalo ekonomicky, aniž by to znamenalo příliš velkou tlakovou ztrátu v proudu spalin. Protože součinitel přestupu tepla na straně spalin je relativně malý, používají se obvykle v konvekčních sekcích povrchy zvětšené pomocí žebrování nebo trnování trubek.

Teplosměnný povrch trubek

Stínící sekce

První dvě řady trubek konvekční sekce ve směru proudění spalin jsou vystaveny radiaci z radiační (spalovací) sekce a jsou označovány jako stínící trubky. Radiační sdílení tepla těmito trubkami je určováno při výpočtu radiační sekce. Poněvadž stínící trubky přijímají teplo i konvektivním přestupem tepla, je celkové tepelné zatížení stínících trubek dáno součtem radiačních a konvektivních tepelných toků. Na těchto stínících trubkách nesmí být použity žádné zvětšené povrchy, protože výsledné špičkové zatížení by mohlo znamenat neúnosně vysoké teploty trubek, které by mohly vést k lokálnímu odpaření ohřívaného media s případným koksováním a poškozením trubek. Stínící trubky se obvykle dělají ze stejného materiálu jako materiál trubek v radiační sekci. Výjimkou mohou být případy, kdy jsou stínící trubky použity v okruhu generátoru páry. [2]

Trubky s hladkým povrchem

I když je snahou co nejdříve použít trubky se zvětšeným povrchem, není to obvykle vhodné na trubkách hned za stínící sekcí. Vychází se z požadavku udržet teplotu stěny trubek v přijatelných mezích, a to jak z hlediska materiálu trubek, tak z hlediska teplotní stability ohřívaného media. Proto bývá několik dalších řad trubek bez zvětšených povrchů.

Hladké trubky mohou být použity v kterékoli části konvekce, ať už z ekonomických, materiálových nebo jiných důvodů.

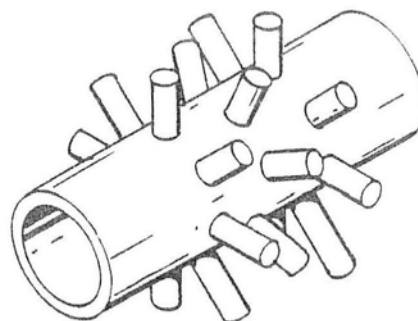
Zvětšené povrchy trubek

Volba zvětšeného povrchu závisí na typu paliva, které se bude v převážné míře používat. Těžké topné oleje totiž více zanáší trubkový systém a zvětšené povrchy. Proto se v případě spalování těžkého topného oleje o hustotě větší než 900 kg/m^3 použijí trnované trubky, které lze snáze čistit. V případě, že se topí plynem nebo lehkým topným olejem o hustotě menší než 900 kg/m^3 , lze použít žebrované trubky. V případě, že budou spalovány různé druhy paliva, je pro volbu zvětšeného povrchu rozhodující nejtěžší uvažované palivo. Pokud byla pec původně navržena jen pro topení plynem a uvažuje se o přechodu na těžké kapalné palivo, je třeba počítat se značnou rekonstrukcí pece.

Trnované trubky

Typy trnů

Válcové trny jsou odporově přivařeny na trubku v kruhových nebo šroubovicových řadách. Standardní trny vyráběné většinou firmami mají průměr 12,7 mm a jsou umístěny v řadách vzájemně od sebe vzdálených o 15,875 mm (63 řad na běžný metr trubky). Některé firmy umožňují úpravu rozteče řad trnů dle přání zákazníka (např. Askhar Precision Tubes Pvt. Ltd. [7]). Počet řad trnů na metr trubky tak lze měnit, každý výrobce však



stanovuje minimální rozteč v závislosti na svých technologických možnostech. Obdobně lze měnit i počet trnů v jedné řadě po obvodu trubky. Maximální počty trnů v řadě závisí na průměru trubky a také na technologických možnostech výrobce trubek. V Tab. 1 jsou uvedeny rozměry trnovaných trubek běžně vyráběných firmou TPS-Technitube Röhrenwerke. Tato firma vyrábí i nestandardní typy trnů menších průměrů a trny eliptického a čočkovitého tvaru. Jejich použití je však omezené vzhledem k jejich snížené mechanické pevnosti a čistitelnosti.

Standardní rozměry trubek*							
Vnější průměr		Tloušťka stěny		Maximální počet trnů v řadě po obvodu trubky		Velikost plochy povrchu trubky na 1 m délky	Poměr ekvivalent. průměrů** při: n_s (max.), n_r = Stand. d (max.), h (max.)
mm	inch	mm	inch	d = 8 mm	d = 12,7 mm	m ² /m	Fi
60,3	2.375	3,9	0.154	9	7	0,165	7,92
73,0	2.875	5,2	0.203	10	8	0,197	7,66
88,9	3.500	5,5	0.216	13	10	0,245	7,66
101,6	4.000	5,7	0.226	15	12	0,283	7,88
114,3	4.500	6,0	0.237	17	13	0,321	7,57
127,0	5.000	4,0	0.156	18	15	0,374	7,47
141,3	5.563	6,6	0.258	21	17	0,402	7,84
152,4	6.000	4,5	0.179	22	18	0,451	7,44
159,0	6.260	4,5	0.179	23	19	0,471	7,49
168,3	6.625	7,1	0.281	25	20	0,484	7,68
219,1	8.625	8,2	0.322	32	26	0,637	7,60

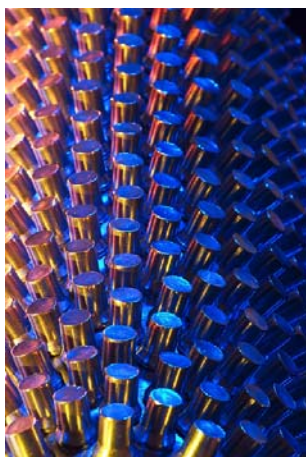
*Standardní rozměry trubek jsou dány běžnými požadavky. Jsou vyráběny i trnované trubky jiných rozměrů v rozmezí od 60,3 mm do 219,1 mm vnějšího průměru trubek.

** Poměr ekvivalentních průměrů $Fi = \frac{d \cdot h_s \cdot n_s \cdot n_r + D_o}{D_i}$, kde d je průměr trnů, h_s je délka trnů, n_s je počet trnů v řadě, n_r je počet řad na metr trubky, D_o je vnější průměr trubek, D_i je vnitřní průměr trubek
Trny se vyrábí v délce od 12,7 mm do 63,5 mm

Tab. 1 Parametry trnovaných trubek [6]

Teplota

Trny z uhlíkaté oceli je možno používat maximálně do teploty cca 560°C vzhledem k možnosti oxidace. Tyto trny je možno použít na libovolný materiál trubek. Trny z legovaných a nerezových ocelí pak lze použít do vyšších teplot, avšak cena trubek tím značně stoupá. Většina výrobců nabízí trny ze všech typů oceli i z dalších slitin.



Obr. 3 Trnované trubky [12]

Délka trnů

Trny jsou k dispozici v různém rozsahu délek podle možností jednotlivých výrobců. Například firma TPS-Technitube Röhrenwerke nabízí trny od délky 12,7 mm do 83,5 mm. Maximální délka trnů závisí i na rozměru trubky, protože vnější průměr trubky a trnů je omezen na 280 mm. Navržená délka trnů obvykle nepřesahuje 50 mm vzhledem k tomu, že účinnost trnů s délkou silně klesá. Volba délky trnů závisí na geometrii konvekční sekce, rychlosti spalin a dovolené teplotě na koncích trnů jak je uvedeno v dalších kapitolách. Ve spodní části konvekční sekce je třeba použít co nejdříve trnované trubky, které mohou mít trny kratší. Délku trnů je pak nutné zvětšovat v závislosti na poklesu teploty spalin, a tím maximální teploty konce trnu.

Žebrované trubky

Žebra jsou navinuta na trubku v šroubovici, a to asi 2 otočky na centimetr. Jsou přivařeny buď kořenově nebo odporově. Přednost se dává odporovému přivařování pro lepší tepelnou vodivost a pevnější spojení s trubkou.



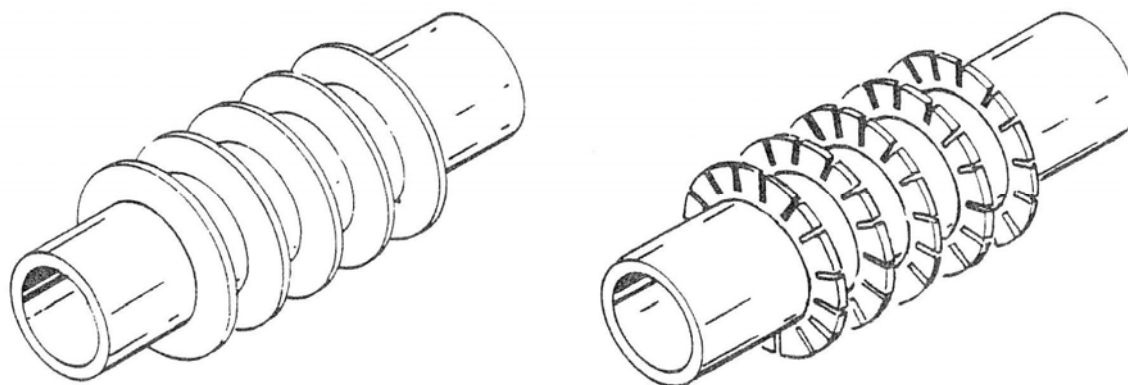
Typy žeber

Spojité neboli nepřerušovaná žebra jsou vyráběna navinutím kovového pásku po obvodu trubky. Tomuto typu se dává přednost před žebry, kdy je pásek před navinutím naříznut.

Nepřerušovaná žebra vykazují větší mechanickou tuhost a lépe se čistí, nařezávaná žebra naopak dávají lepší přestup tepla. Dále uvedené výpočtové postupy se týkají nepřerušovaných žeber.

Rozměry žeber

K dispozici je mnoho různých typů žeber, nejběžněji používané rozměry jsou: výška žeber od 12,7 do 25,4 mm, tloušťka žeber 1,3 mm, rozteč žeber od 5,1 do 6,4 mm. Například firma TPS-Technitube Röhrenwerke vyrábí žebrované trubky od 16 do 219,1 mm vnějšího průměru, výška žeber je do 50 mm, tloušťka žeber je v rozsahu od 0,9 do 6,0 mm a na metr trubky je možné navinout od 50 do 250 řad žeber (rozteč tedy je od 4 do 20 mm) viz [6] str. 133.



Obr. 4 Žebrované trubky s nepřerušovanými a nařezávanými žebry

Materiál

Používají se různé druhy materiálu. Poněvadž žebra jsou mnohem tenčí než trny, je třeba materiál volit pečlivě podle maximální teploty vršku žebra, vzhledem k možné oxidaci. Čím vyšší je teplota, tím kvalitnější materiál je třeba zvolit.

Běžně se používají následující materiály [2]:

Materiál žebra	Maximální teplota vršku žebra
Uhlíkatá ocel	455°C
11 - 13 Cr	675°C
18/8 Cr/Ni	790°C
25/20 Cr/Ni	980°C

Dispoziční řešení konvekční sekce

Dispoziční řešení konvekční sekce závisí především na potřebách procesu, pro který je pec určena. Parametry jako optimální hmotová rychlost spalin, součinitel přestupu tepla apod. jsou závislé hlavně na ohřivaném mediu.

Délka L_c

Efektivní délka konvekční (a stínící) sekce závisí na konkrétním typu uvažované navrhované pece. Obecně platí, že by délka trubek konvekce měla být co největší, konvekční sekce ale nesmí přesahovat přes sekci radiační. V případě šachtové pece je tedy délka konvekční sekce omezená délkou radiační sekce. V případě vertikální válcové pece je situace komplikovanější. Obdélníkový půdorys konvekční sekce musí být vepsán v kruhu o průměru vyzdívkou radiační sekce. Návrh délky a šířky pece je tedy optimalizační proces, při kterém se mění počet trubek v horizontální řadě (a tím i šířka sekce) a efektivní délka trubek. Snahou je získat co největší povrch trubek, a přitom nepřekročit maximální hmotovou rychlost spalin (okolo $2 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$) podle druhu paliva viz Volba rychlosti spalin).

Pro mechanické čištění vnitřku trubek se místo kolen na konce trubek montují vratné hlavice. Pokud jsou použity, jsou umístěny ve vnějších komorách (tam mohou být na přání zákazníka umístěny i kolena propojující trubky). Pak je do efektivní délky počítána jen ta délka, kde jsou trubky omývány proudem spalin.

Šířka W_c

V každé horizontální řadě konvekční sekce by měly být nejméně 4 trubky. Pouze ve velmi malých pecích je možno uvažovat o 2 nebo 3 trubkách v řadě.

V případě, že konvekční sekce je tak dlouhá, že je zapotřebí uvažovat o vnitřních trubkových podpěrách, je doporučena maximální šířka konvekční sekce 4,5 m, neboť s výrobou trubkových podpěr větší šířky jsou značné problémy.

U vertikálních válcových pecí je šířka konvekce závislá na délce (viz výše).

Počet chodů

V případě, že v peci dochází k odpařování ohřivaného média, je třeba, aby počet chodů v konvekční i radiační sekci byl stejný. V případě ohřevu plynů může být počet chodů v konvekční a radiační sekci různý. Ohřivaná látka je pak před vstupem do radiace přerozdělena.

Kolena

Z hlediska využití prostoru a i ceny je výhodnější používat standardní 180° U-kolena. Kolena s velkým poloměrem mají menší tlakové ztráty. V případech, kdy jsou z nějakých důvodů vyžadovány nestandardní rozteče, je možno použít následující seznam minimálních roztečí trubek v konvekčních sekcích (Tab. 2), vycházejících z výrobních požadavků na světlost mezi trubkami. Od výrobců je však v případě potřeby možno požadovat větší rozteče než uvedené minimální.

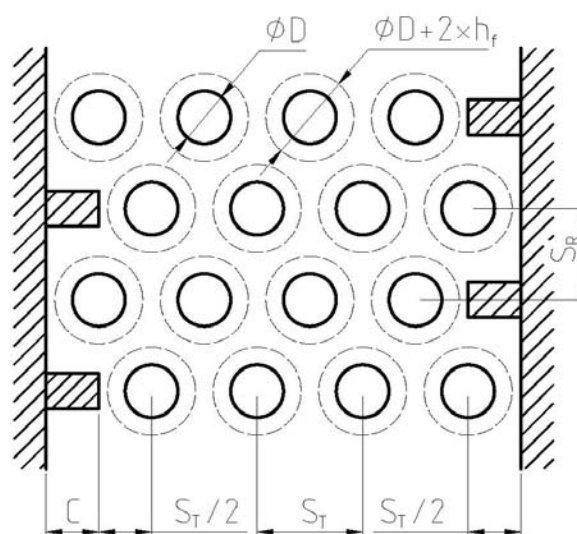
Místo kolen lze použít vratné hlavice, pokud je třeba vnitřek trubek čistit mechanicky.

Nominální průměr trubek, mm	Standardní rozteč, mm	Minimální rozteč, mm	Vnější průměr trubek, mm	Standardní rozteč, mm	Minimální rozteč, mm
50	102	102	76,2	152	127
80	152	152	101,6	203	152
100	203	171	127,0	254	191
125	254	210	152,4	305	229
150	305	241			
200	406	305			

Tab. 2 Minimální rozteče trubek [2]

Uspořádání trubek a jejich rozteče

Je několik možností uspořádání trubek. Obvykle jsou trubky v uspořádání rovnostranného trojúhelníka (viz Obr. 5). Toto uspořádání je výhodnější než uspořádání trubek do zákrytu, hlavně z hlediska přestupu tepla. Základní příčná rozteč trubek se může měnit podle požadavku na rychlost spalin. Pokud jsou použity zvětšené povrchy, jsou minimální vzdálenosti mezi vršky trnů nebo žebër sousedních trubek 38 mm. To platí pro všechny směry a vyplývá to z požadavku na konstrukci trubkových podpěr. Tento požadavek také omezuje maximální délku zvětšených povrchů, která může být uvažována pro danou rozteč trubek. Minimální vzdálenost vršek trnů nebo žebër od vyzdívky stěn konvekční sekce je 20 mm.



Obr. 5 Uspořádání trubek

Výstupky vyzdívky

Výstupky vyzdívky, které zabraňují vzniku zkratových proudů spalin u stěn vyzdívky, musí být v každé řadě konvekční sekce, s výjimkou první řady, tj. první řady stínící sekce. Běžně je maximální šířka výstupku 150 mm. Daná šířka výstupků se obvykle používá v celé konvekční sekci.

Výstupky omezují volný průřez konvekční sekce, čímž zvyšují rychlost spalin a tím i součinitel přestupu tepla. U první řady stínící sekce není zvyšování přestupu tepla žádoucí, a proto zde se výstupek zásadně nedává.

Podpěry trubek

Maximální nepodepřená délka horizontálních pecních trubek je 35-násobek vnějšího průměru trubek (s výjimkou stínících trubek v pecích parních reformingů, kde je zapotřebí více podpěr). V konvekčních sekcích, které jsou delší než výše uvedená délka, je třeba použít vnitřní podpěry trubek [2].

Nominální rozměr trubek [mm]	Maximální nepodepřená délka [m]
100	3,99
125	4,94
150	5,90

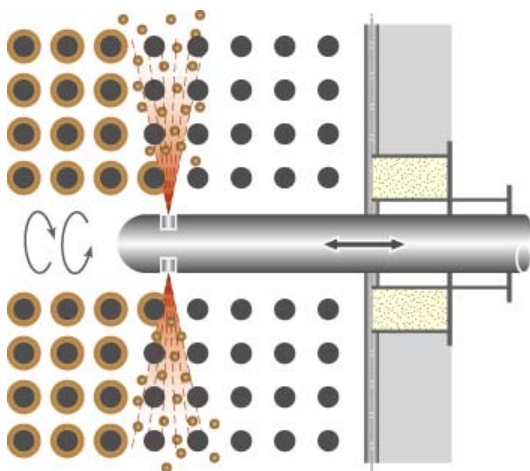
Čištění konvekčních sekcí

V případě, že je spalováno palivo, které způsobuje zanášení pece sazími (těžší topné oleje), je nutné zajistit čištění trubek na straně spalin. K tomu se využívají tzv. ofukovače sazí (soot blower). Používají se hlavně dva typy těchto zařízení: vysouvatelné ofukovače a pevné rotační ofukovače. Ofukovače pracují tak, že tryskají na vsazek trubek vysokotlakou párou nebo jiné stlačené medium. Čištění probíhá za provozu pece a spouští se většinou automaticky v určitých intervalech.

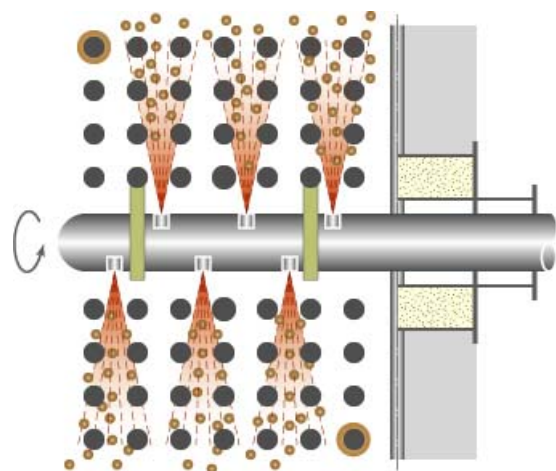
Vysouvatelné ofukovače se vysouvají do prostoru pece a současně se natáčí okolo své osy, čímž je proud páry z trysek postupně směřován na všechny trubky (viz Obr. 6a). Ofukovač je tedy mezi trubkami vysunut pouze během čištění nánosů sazí, což je výhodné, protože nezpůsobuje tlakové ztráty při běžném provozu [8].

Pevné rotační ofukovače jsou stabilně namontovány mezi řadami trubek a mají trysky po celé své délce. Při čištění se pouze otáčí kolem své osy, čímž směřují řady trysek na všechny trubky (viz Obr. 6b). Nevýhodou tohoto typu ofukovačů je, že trvale zvyšují tlakové ztráty v peci. Také spotřeba páry je vyšší než u výsuvných ofukovačů. Protože jsou trubky ofukovačů v peci podepřeny, může být jejich konstrukce subtilnější, a proto jsou levnější než výsuvné ofukovače [8].

Ofukovače jsou montovány vždy po šestnácti řadách hladkých trubek namísto další trubkové řady. V případě použití zvětšených povrchů musí být ofukovače umístěny po každých čtyřech řadách.



Obr. 6a Výsuvný ofukovač sazí [9]



Obr. 6b Pevný rotační ofukovač sazí [9]

Požadavek na periodické ofukování trubek konvekčních sekcí, a tudíž na instalaci automatických ofukovačů, tvoří v investičních nákladech značnou položku. Již z toho důvodu je třeba návrhu konvekční sekce věnovat značnou pozornost, aby se dosáhlo nejvhodnějšího počtu řad, počtu trubek v řadě, a tím také počtu ofukovačů. Zvětšování počtu trubek v řadě, a tedy zvětšení šířky konvekce, může vést ke sníženému počtu ofukovačů. Proti tomu však jde snižování rychlosti spalin, a tudíž i snižování kontrolního součinitele přestupu tepla. Pokud je dostatek cenových podkladů, je zde prostor pro aplikaci optimalizačních postupů.

Návrh konvekční sekce

Výpočtu konvekční části pece musí předcházet bilanční výpočet pece a výpočet sekce radiační (viz návrh pece). Pro samotný návrh konvekce je třeba znát množství a vlastnosti ohřivaných medií a jejich vstupní a výstupní teploty a také průtok spalin a jejich teplotu na vstupu a výstupu do a z konvekce. Teprve potom lze přikročit k návrhu konvekční sekce.

Návrh konvekční sekce pece začíná volbou její délky a šířky. Tyto rozměry jsou voleny na základě optimalizace (viz. Délka L_c a Šířka W_c). Určení těchto rozměrů není v programu obsaženo, proto zde nebude popsáno. Dalším krokem návrhu je rozdělení konvekce na sekce.

Uspořádání konvekční sekce

Protože se ve výpočtu musí zohlednit všechny parametry konvekce a zároveň se některé tyto parametry v různých úsecích konvekce mění, je nutné konvekční sekci rozdělit na několik částí. Každou část konvekce, která má jiný materiál trubek nebo případně jiný průměr trubek, ve které proudí jiné medium nebo jsou použity jiné zvětšené povrchy, je tedy třeba počítat jako zvláštní sekci. Takto získané sekce se počítají postupně, a to od stínící sekce až k poslední sekci konvekce. Pro jednotlivé sekce se musí zvolit typ zvětšených povrchů. Je zde snaha používat zvětšené povrchy co nejvíce, ale nesmí přitom dojít k překročení jejich maximální teploty, ani k překročení maximální teploty media v trubkách. Ve stínící sekci se zvětšené povrchy nepoužívají vůbec (viz Stínící sekce). V dalších sekcích se pak postupně používají čím dál vyšší zvětšené povrchy.

V případě, že je v konvekci ohříváno více medií, je třeba určit, v jakém pořadí budou do pece vstupovat a případně vystupovat ven. Přidělení ohříváných medií k jednotlivým sekcím výrazně ovlivňuje maximální teploty trubek a zvětšených povrchů v sekci a také velikost teplosměnné plochy sekce nutné pro dodání zadaného tepelného příkonu. Na začátku konvekce mají spaliny vysokou teplotu (na vstupu do stínící sekce je to jízková teplota spalin T_{bw}). Je zde tedy značný teplotní spád mezi spalinami a ohříváním médiem, a proto pro dosažení potřebného přestupu tepla postačí menší teplosměnná plocha. Zároveň vyšší teplota spalin znamená i vyšší teplotu trubek a zvětšených povrchů. Pokud je tedy v těchto částech ohříváno medium na nižší teploty, zmenší se teplosměnná plocha a díky rychlejšímu chlazení trubek i jejich teplota (záleží i na součiniteli přestupu tepla pro medium). Potom by však na další sekce zbylo teplejší medium (s vyšší vstupní i požadovanou výstupní teplotou) a chladnější spaliny. Tím by došlo ke snížení teplotního gradientu a neúměrnému zvětšení teplosměnné plochy (nebo dokonce k překřížení teplot media a spalin). Proto se pro ohřev jednoho hlavního media volí protiproudý chod spalin a media. Medium tedy vstoupí do konvekce v poslední sekci a opustí ji ve stínící sekci, odkud pokračuje do radiační sekce. Případná další externí media jsou pak přiváděna do některých sekcí pece namísto media hlavního. To je pak vedeno okolo této sekce vnějším potrubím. Externí media jsou místo hlavního dosazována většinou tak, aby jejich vstupní a výstupní teploty přibližně odpovídaly teplotám hlavního media před a za počítanou sekci. Každopádně je třeba sledovat, zda nedojde k překřížení teplot media a spalin.

Po volbě uspořádání konvekce se pokračuje postupnými výpočty podle následujícího algoritmu.

Obecný postup při návrhu konvekční sekce pecí

Krok 1.

Prvním krokem při návrhu konvekční sekce je určení průměrů trubek, jejich roztečí a počtu chodů media. Na základě toho a s ohledem na doporučené rychlosti spalin v konvekci lze optimalizací určit délku a šířku konvekční sekce.

Krok 2.

Konvekce je rozdělena na určitý počet sekcí. Sekce vzniká pro každou část konvekce, která se od předchozích liší kterýmkoli parametrem (materiál trubek, průměr trubek, ohřívání medium apod.). V případě, že je v konvekci ohříváno více medií, je třeba určit, v jakém pořadí budou do pece vstupovat a případně vystupovat ven. Přidělení ohříváných medií k jednotlivým sekcím totiž výrazně ovlivňuje další parametry konvekce počítané dále.

Krok 3.

Z tepelné bilance radiační sekce se určí teplota média vystupujícího ze stínících trubek. Musí se spočítat teplo převedené stínícím trubkám radiací. Teplota spalin vstupujících do stínící sekce je tzv. jízková teplota T_{bw} určená při výpočtu radiační sekce.

Krok 4.

Pro každou novou navrhovanou sekci se určí maximální teplota média a maximální teplota na zvětšených površích. To se provede pro první řadu nové sekce, kde je použit jiný materiál, jiný zvětšený povrch atd. Tento výpočet vychází z teploty vstupujících spalin a teploty vystupujícího média v této řadě.

Příliš vysoké teploty mohou způsobit:

1. Příliš vysoká teplota ve filmu: koksování nebo zhoršování kvality produktů.
2. Vysoká teplota koncových částí zvětšených povrchu: oxidace - opalování.
3. Příliš vysoká teplota materiálu trubek: oxidace, koroze, snížení pevnosti.

Krok 5.

Je-li příliš vysoká teplota média ve filmové vrstvě nebo teplota konců zvětšených povrchů, musí se snížit intenzita sdílení tepla následujícími opatřeními:

1. U sekcí s hladkými trubkami se buď sníží hmotová rychlost spalin zvětšením roztečí trubek, nebo se zvýší vnitřní součinitel přestupu tepla zmenšením rozměrů trubek
2. U zvětšených povrchů se snižuje výška trnů nebo žeber, zmenší se rozteč žeber nebo se použijí hladké trubky. Obvykle je třeba nad sekcí stínících trubek mít sekci s několika řadami hladkých trubek tak, aby v následující sekci se zvětšeným povrchem nedošlo k výše zmíněným situacím.

Krok 6

Pro každou novou navrhovanou sekci se určí vstupní a výstupní teplota, a to jak pro spaliny, tak pro ohřívané medium. Vstupní teplota spalin a výstupní teplota média je známa z předchozí sekce. Vstupní teplota média a výstupní teplota spalin se určí iteračním výpočtem z rovnice přestupu tepla a z bilančních rovnic. Pro první iteraci se odhadne buď výstupní teplota spalin nebo vstupní teplota média.

Krok 7.

Pokračuje se s další sekcí - provedou se výše uvedené kroky 4 až 6.

Obvykle je užitečné použít více typů trnů lišících se délkou, případně roztečí a materiálem, aby bylo dosaženo vhodných hodnot teploty média a teploty materiálu zvětšených povrchů při maximálním přestupu tepla.

U žebrovaných trubek se rovněž používají různé kombinace výšky žeber, roztečí a materiálu.

Krok 8.

Postupuje se výše uvedenými kroky tak dlouho, až je splněn požadavek na celkový tepelný tok, který má být v konvekční sekci předáván.

Krok 9.

Provede se kontrola dispozičního řešení konvekční i radiační sekce z hlediska potrubního propojení a celkových případných specifikací pro tuto jednotku.

Vzorce a výpočtové postupy

Rychlost spalin G_c

Rychlost spalin v konvekční sekci G_c [$\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$] je jednou z hlavních veličin pro návrh konvekční sekce. Mění se v každé části konvekce podle použitých trubek, jejich roztečí a zvětšených povrchů.

$$G_c = \frac{W_f}{A_f} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ s}} \right] \quad (1)$$

W_f je průtok spalin, kg/s

A_f je volný průtočný průřez pro průtok spalin, m^2

Průtok spalin W_f

Většinou je vypočítán při návrhu radiační sekce pece.

$$W_f = F_g FG \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (2)$$

F_g je celková spotřeba paliva, kg/s

FG je množství spalin vzniklé spálením 1 kg paliva, $\frac{\text{kg spalin}}{\text{kg paliva}}$

Množství spalin FG vzniklé spálením 1 kg paliva lze vypočítat materiálovou bilancí spalování na základě složení paliva a přebytku vzduchu. Pro potřeby programu byla použita křivka závislosti množství spalin FG [kg spalin/ kg paliva] na výhřevnosti paliva hp [MJ/kg paliva] a přebytku vzduchu ea [%] pro případ spalování zemního plynu [2]. Pro spalování topného oleje je to křivka závislosti množství spalin FG na hustotě oleje a přebytku vzduchu ea [2].

Celková spotřeba paliva F_g

$$F_g = \frac{\left(1 + \frac{Q_z}{100}\right) Q_a}{HA_s} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (3)$$

HA_s je množství tepla dostupné ve spalinách, MJ/kg paliva

Q_a je teplo absorbované v peci, MW

Q_z jsou tepelné ztráty pece v %

Množství tepla dostupné ve spalinách HA_s [MJ/kg paliva] lze vypočítat tepelnou bilancí spalování. Teplo do pece vnáší spalovací vzduch a palivo. V peci vzniká teplo spalováním paliva a ven odchází teplo se spalinami, ohřívánými medií a tepelnými ztrátami pece. Teplo dostupné ve spalinách je součet tepla využitého pro ohřev medií a tepla zmařeného tepelnými ztrátami.

Teplo dostupné ve spalinách je v programu vypočteno interpolací tabulkových hodnot [2]. Tabulky jsou sestaveny pro vstupní teplotu vzduchu i paliva 15°C . Pro spalování plyných paliv je pak dostupné teplo závislé na výhřevnosti paliva hp , přebytku vzduchu ea a na teplotě spalin na výstupu do komína, tzv. komínová teplota T_s [$^\circ\text{C}$]. Pro spalování topného oleje je dostupné teplo závislé na hustotě oleje, na přebytku vzduchu ea a na komínové teplotě T_s .

Volný průtočný průřez A_f

Volný průtočný průřez pro průtok spalin se pro různé části konvekční sekce liší podle typu a počtu řad trubek a podle zvětšených povrchů.

Pro hladké trubky ve stínící sekci, kde nejsou výstupky vyzdívky platí:

$$A_f = (L_c W_c - D_0 L_c Nt) [m^2] \quad (4)$$

L_c je efektivní délka konvekční sekce, m

D_0 je vnější průměr trubek, m

Nt je počet trubek v řadě, -

W_c je šířka konvekční sekce, m

V programu je šířka konvekce vypočtena podle vzorce:

$$W_c = S_T (Nt + 0,5) [m] \quad (5)$$

S_T je příčná rozteč trubek v řadě (viz Obr. 5), m

Pro hladké trubky mimo stínící sekci (pec je s výstupky) platí:

$$A_f = (L_c W_c - D_0 L_c Nt - C) [m^2] \quad (6)$$

C je šířka výstupku vyzdívky, m

Pro trnované trubky platí:

$$A_f = (L_c W_c - D_0 L_c Nt - C - h_s d L_c Nt n_r) [m^2] \quad (7)$$

h_s je výška trnů, m

d je průměr trnů, m

n_r je počet řad trnů na metr trubky, -

Pro žebrované trubky platí:

$$A_f = \left(L_c W_c - D_0 L_c Nt - C - \frac{2 h_f t_f L_c Nt}{n_f} \right) [m^2] \quad (8)$$

h_f je výška žeber, m

t_f je tloušťka žeber, m

n_f je rozteč žeber, m

Volba rychlosti spalin

Pro případy, kdy výška komína je určována požadavkem na tah, jsou doporučené rychlosti spalin uvedeny v Tab. 3. Při kombinaci paliv je třeba uvažovat nejtěžší kapalné palivo:

Palivo	Doporučená maximální rychlost spalin G_c
Čistý rafinérský nebo zemní plyn	2,5 až 3,0 kg/(m ² s)
Lehký topný olej nebo plyn s obsahem síry	2,0 až 2,5 kg/(m ² s)
Těžké topné oleje	1,5 až 2,0 kg/(m ² s)

Tab. 3 Doporučená rychlost spalin [2]

Tato doporučení se vztahují na části konvekční sekce s nejvyšší hmotovou rychlostí (s největším zvětšeným povrchem); hmotové rychlosti v sekcích s hladkými trubkami mohou

být nižší než uvedené hodnoty. Uvedená rozmezí rychlostí odpovídají optimálnímu návrhu za běžných podmínek. Za určitých podmínek, které jsou uvedeny dále, je lepší volit vyšší rychlosti spalin. V ostatních případech jsou nižší rychlosti výhodnější. Volbou větší šířky pece se například sníží počet potřebných ofukovačů sazí. Každopádně je třeba se vyhnout rychlostem pod $1,0 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

V případě, že vychází vyšší rychlost spalin, než jsou výše uvedené doporučené hodnoty, je třeba sáhnout k úpravám. Je možno zvyšovat počet trubek v řadě, nebo zvětšit příčnou rozteč trubek. Každopádně se však zvětší šířka pece. Přednost má zvětšení počtu trubek, je však třeba mít na mysli, že počet trubek v řadě by měl odpovídat násobku počtu paralelních proudů. Za určitých podmínek počet trubek v řadě nemusí respektovat výše uvedenou zásadu. Je například možno mít při čtyřchodém uspořádání 6 trubek v řadě za podmínky dodržení symetrie jednotlivých chodů. První proud pak bude mít jednu trubku v první řadě a dvě trubky v řadě druhé. Druhý proud bude mít dvě trubky v první řadě a v další řadě jen jednu. Třetí a čtvrtý proud bude uspořádán obdobně. V případě, že počet trubek v řadě se rovná počtu chodů, je možné pro dosažení požadované rychlosti spalin měnit rozteč trubek. Tuto rozteč je pak třeba dodržet v celé konvekční sekci.

V případě, kdy výška komína je určena ekologickými hledisky, je možno přijmout podstatně vyšší rychlosti spalin, než je uvedeno výše. Ovšem i v těchto případech by tlaková ztráta spalin přes konvekční sekci neměla být větší než polovina tahu, který zajistí komín.

U pecí vybavených spalinovým ventilátorem je rovněž možno počítat s vyššími rychlostmi spalin. Je však třeba mít na zřeteli i možnost práce s vyřazeným (bypassovaným) ventilátorem. Optimální rychlost spalin by v těchto případech měla být výsledkem ekonomického rozboru, kdy se vyhodnocují úspory na velikosti konvekce s náklady na ventilátor. Obvyklé optimum rychlosti spalin při ventilátorovém odsávání se pohybuje v rozmezí $3,5$ až $4,4 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

Výkon konvekční sekce

Výkon konvekční sekce se rovná celkovému tepelnému výkonu pece minus výkon radiální sekce. Přitom ale tzv. stínící trubky (dvě první řady konvekční sekce) absorbovaly teplo jak radiací z radiální sekce, tak konvekcí z proudících spalin. U spalin odcházejících z radiální sekce se předpokládá, že předaly teplo trubkám v radiální sekci i radiální teplo stínícím trubkám konvekční sekce.

Celkový výkon pece Q_a

$$Q_a = (Q_r + Q_{sr} + Q_c) [W] \quad (9)$$

Q_r je teplo absorbované v radiální sekci, W

Q_{sr} je teplo absorbované radiací stínícími trubkami, W

Q_c je celkové teplo absorbované v konvekční sekci s výjimkou radiálního sdílení tepla z radiální sekce stínícím trubkám, W

Celkový výkon radiální sekce Q_{tr}

$$Q_{tr} = (Q_r + Q_{sr}) [W] \quad (10)$$

Jízková teplota T_{bw} závisí na Q_{tr}

Celkový výkon konvekční sekce Q_{tc}

$$Q_{tc} = (Q_c + Q_{sr}) [W] \quad (11)$$

Výkony radiační a konvekční sekce se překrývají, protože oba obsahují radiační teplo předané ve stínící sekci. Výkon konvekční sekce Q_{tc} závisí na teplotě na přestupu z radiační do konvekční sekce.

Teplo předané ve stínící sekci Q_s

$$Q_s = (Q_{sr} + Q_{sc}) [W] \quad (12)$$

Q_{sc} je teplo absorbované konvekcí ve stínících trubkách, W

Teplo předané ve stínící sekci radiací Q_{sr}

Stínící sekce je přímo vystavena záření z radiační sekce, a proto absorbuje část radiačního výkonu. Tento tepelný výkon je obsažen v teple pohlceném při ochlazení spalin na jízkovou teplotu T_{bw} .

$$Q_{sr} = L_c W_c \phi_s [W] \quad (13)$$

L_c je efektivní délka konvekční sekce, m

W_c je šířka konvekční sekce, m

ϕ_s je hustota tepelného toku na trubky, W/m^2

Pro většinu procesních pecí se může ϕ_s uvažovat rovnou hustotě tepelného toku v radiační sekci:

$$\phi_s = 1.77 \phi_{1-side} \left[\frac{kg}{s^3} \right] \quad (14)$$

ϕ_{1-side} je hustota tepelného toku při jednostranném ozařování, W/m^2

Radiační výkon stínící sekce tedy je:

$$\phi_s = 1.77 L_c W_c \phi_{1-side} [W] \quad (15)$$

Rovnice celkového přenosu tepla

Přenos tepla v konvekční sekci (kromě radiačního tepelného výkonu stínících trubek) se řídí podle obecné rovnice:

$$Q = U A LMTD [W] \quad (16)$$

U je celkový součinitel prostupu tepla, $W/(m^2 \cdot K)$

A je plocha výměny tepla, m^2

$LMTD$ je střední teplotní logaritmický spád mezi spalinami a procesním mediem, $^{\circ}C$

$$LMTD = \frac{T_{g1} - T_{b1} - T_{g2} + T_{b2}}{\ln \left(\frac{T_{g1} - T_{b1}}{T_{g2} - T_{b2}} \right)} [^{\circ}C] \quad (17)$$

T_{g1} je teplota spalin na vstupu do sekce, $^{\circ}C$

T_{b1} je teplota media vystupujícího ze sekce, $^{\circ}C$

T_{g2} je teplota spalin na výstupu ze sekce, $^{\circ}C$

T_{b2} je teplota media na vstupu do sekce, $^{\circ}C$

Celkový součinitel prostupu tepla U

Tento koeficient uvažuje součinitel přestupu tepla z media na trubku, tok stěnou trubky a součinitel přestupu tepla z trubky do spalin.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o t_a}{A_m k_m}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (18)$$

h_o je součinitel přestupu tepla na vnější straně trubky, $W/(m^2 \cdot K)$

h_i je součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky, $W/(m^2 \cdot K)$

A_o je celkový vnější povrch trubek, m^2

A_i je vnitřní povrch trubek, m^2

A_m je střední plocha trubky, m^2

t_a je střední tloušťka stěny trubky, m

k_m je tepelná vodivost trubky, $W/(m^2 \cdot K)$

Vnitřní povrch trubek A_i

$$A_i = \pi D_i L_c Nc Nt [m^2] \quad (19)$$

D_i je vnitřní průměr trubek, m

L_c je efektivní délka konvekční sekce, m

Nt je počet trubek v řadě, -

Nc je počet řad trubek v dané části konvekční sekce, -

Střední povrch trubek A_m

$$A_m = \pi (D_o - t_a) L_c Nc Nt [m^2] \quad (20)$$

D_o je vnější průměr trubek, m

Vnější povrch trubek A_o

$$A_o = (A_e + A_b) [m^2] \quad (21)$$

A_e je plocha zvětšeného povrchu trubek, m^2

A_b je plocha odkrytých trubek, m^2

Pro hladké trubky platí:

$$A_b = \pi D_o L_c Nc Nt [m^2] \quad (22)$$

$$A_e = 0 \quad (23)$$

Pro trnované trubky platí:

$$A_e = \left(\pi d_s h_s n_r n_s + \frac{1}{4} \pi d_s^2 n_r n_s \right) L_c Nc Nt [m^2] \quad (24)$$

$$A_b = \left(\pi D_o - \frac{1}{4} \pi d_s^2 n_r n_s \right) L_c Nc Nt [m^2]$$

(25)

h_s je výška trnů, m
 d je průměr trnů, m
 n_r je počet řad trnů na metr trubky, -
 n_s je počet trnů po obvodu, -

Pro žebrované trubky platí:

$$A_e = \frac{\pi ((D_o + 2 h_f)^2 - D_o^2 + 2 (D_o + 2 h_f) t_f) L_c N_c N_t}{2 n_f} [m^2] \quad (26)$$

$$A_b = \frac{\pi D_o (1 - t_f) L_c N_c N_t}{n_f} [m^2] \quad (27)$$

h_f je výška žeber, m
 t_f je tloušťka žeber, m
 n_f je rozteč žeber, m

Součinitel přestupu tepla uvnitř trubek h_i [W/(m²·K)] lze vypočítat například podle Gnielinskeho rovnice [3]. Úprava této rovnice pro základní fyzikální vlastnosti medií je použita v programu.

$$h_i = \frac{1}{8} \left(\frac{G D_i}{\mu} - 1000 \right) C_p \mu \left(1 + \left(\frac{D_i}{L} \right)^{(2/3)} \right) / \left(\left(\frac{1.82 \operatorname{Log} \left(\frac{G D_i}{\mu} \right)}{\operatorname{Log}(10)} - 1.64 \right)^2 \right. \\ \left. \left(1 + 3.175 \sqrt{2} \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{1.82 \operatorname{Log} \left(\frac{G D_i}{\mu} \right)}{\operatorname{Log}(10)} - 1.64 \right)^2} \left(\left(\frac{C_p \mu}{K} \right)^{(2/3)} - 1 \right)} \right) D_i \right) \quad (28)$$

G je hmotová rychlost média proudícího trubkovým systémem, kg/(m²s)
 L je celková dráha proudícího média, m
 μ je dynamická viskozita proudícího média, Pa·s
 C_p je tepelná kapacita média, J/(kg·K)
 K je součinitel tepelné vodivosti média, W/(m·K)

Celková dráha proudícího média L

$$L = \frac{L_c N_t N_c}{N_p} [m] \quad (29)$$

N_p je počet chodů média v systému trubek, -

Součinitel přestupu tepla vně trubek (na straně spalin) h_o

Je různý pro stínící sekci, pro hladké trubky mimo stínící sekci a pro různé druhy zvětšených povrchů.

Pro hladké trubky:

$$h_o = (h_c + h_r) \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}^3 \text{K}} \right] \quad (30)$$

h_c je součinitel přestupu tepla pro konvekci, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

h_r je součinitel přestupu tepla pro radiaci, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Konvektivní součinitel přestupu tepla pro hladké trubky h_c [$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$] lze vypočítat pomocí různých korelačních vztahů na základě podobnostních kritérií. Program používá následující proceduru pro výpočet přestupu tepla ze spalin vně trubek při křížovém toku [4].

Geometrické parametry trubkového systému:

```
If B >= 1 Then
  psi = 1 - Pi / (4 * A)
Else
  psi = 1 - Pi / (4 * A * B)
End If
xL = Pi * Do / 2
```

Výpočet Reynoldsova čísla:

```
Re = w_1 * xL / 1000 / (psi * mu)
```

Výpočet Nusseltova čísla:

```
nuL = 0.664 * Re ^ (1 / 2) * pr ^ 0.333
nut = (0.037 * Re ^ 0.8 / (1 + 2.443 * Re ^ (-0.1) * (pr ^ 0.667 - 1))) * pr
nus0 = 0.3 + (nuL ^ 2 + nut ^ 2) ^ 0.5
If us = 1 Then
  fa = 1 + 0.7 / psi ^ 1.5 * (B / A - 0.3) / (B / A + 0.7) ^ 2
Else
  fa = 1 + 2 / (3 * B)
End If
nus = nus0 * fa
```

Určení výsledného součinitele přestupu tepla:

$$h_c = \text{nus} * K_s / (xL / 1000) \quad (31)$$

A je poměr příčné rozteče trubek v řadě a vnějšího průměru trubek, -

B je poměr podélné (svislé) rozteče řad trubek a vnějšího průměru trubek, -

w_1 hmotová rychlost spalin ve volném průřezu, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

μ - μ_s je dynamická viskozita spalin, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

K_s - K_s je součinitel tepelné vodivosti spalin, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$

pr je Prandtlovo číslo, -

Prandtlovo číslo pr

$$pr = \frac{C_{p_s} \mu_s}{K_s} \quad (32)$$

C_{p_s} je tepelná kapacita spalin, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

Fyzikální vlastnosti spalin jsou určeny z funkcí jejich závislosti na teplotě pro střední teplotu spalin.

Radiační součinitel přestupu tepla pro hladké trubky h_r

Pro určení radiačního součinitele přestupu tepla jsou v programu opět použity empirické vztahy [2]. Pro stínící sekci je přestup tepla radiací ze spalin zahrnut v teple předaném z radiační sekce Q_{sr} . Proto se ve stínící sekci součinitel h_r uvažuje roven nule. Pro všechny další sekce platí:

$$h_r = F_1 F_2 \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (33)$$

F_1 je teplotní součinitel, závislý na průměrné teplotě spalin a stěny trubky v trubkovém svazku.

F_2 je rozměrový součinitel konvekční sekce, který je funkcí geometrie trubek a vlastností spalin.

Teplotní součinitel F_1

Je vypočten interpolací tabulkových hodnot v závislosti na průměrné teplotě spalin a stěny trubky v trubkovém svazku, kde se předpokládá, že průměrná teplota stěny trubky je o 15 °C teplejší než teplota media.

Rozměrový součinitel F_2

$$F_2 = L_b P_{CO_2 + H_2O} \quad (34)$$

L_b je střední délka radiačního paprsku v konvekční sekci, m

$P_{CO_2 + H_2O}$ je parciální tlak oxidu uhličitého a vodní páry ve spalinách. Součinitel je určen interpolací tabulkových hodnot v závislosti na přebytku vzduchu ea a procentu uhlíku v palivu.

Střední délka radiačního paprsku L_b

Pro uspořádání trubek do trojúhelníku:

$$L_b = \left(\frac{0.00108 S_R S_T}{D_o} - 0.00085 D_o \right) [m] \quad (35)$$

Pro zákrytové uspořádání trubek:

$$L_b = \left(\frac{0.0013 S_R S_T}{D_o} - 0.00102 D_o \right) [m] \quad (36)$$

S_R je podélná (svislá) rozteč řad trubek, mm

S_T je příčná rozteč trubek v řadě (viz Obr. 5), mm

Součinitel přestupu tepla na straně spalin h_o pro zvětšené povrchy

$$h_o = \frac{h_e (E A_e + A_b)}{A_o} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (37)$$

h_e je součinitel přestupu tepla pro zvětšené povrchy $W/(m^2 \cdot K)$

E je faktor účinnosti zvětšeného povrchu, -

Součinitel přestupu tepla pro zvětšené povrchy h_e

Pro trnované trubky:

$$h_e = \frac{71.3 G_c^{0.55} (0.01798561151 T_g + 4.912769784)^{0.48}}{D_o^{0.45}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (38)$$

Pro žebrované trubky:

$$h_e = \frac{40.7 G_c^{0.55} (0.01798561151 T_g + 4.912769784)^{0.48}}{D_o^{0.45}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (39)$$

G_c je hmotová rychlost spalin, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

T_g je střední teplota spalin, $^\circ\text{C}$. $T_g = T_{g1} - T_{g2}$

Faktor účinnosti zvětšeného povrchu E

Pro trnované trubky lze vypočítat z funkční závislosti faktoru účinnosti na součiniteli zvětšeného povrchu trny Exs . Funkce je dána interpolací experimentálně stanovené křivky [2].

$$Exs = h_s \sqrt{\frac{h_e}{k_{ms} d_s}} \quad (40)$$

k_{ms} je součinitel tepelné vodivosti trnů, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Pro žebrované trubky platí závislost faktoru účinnosti na součiniteli zvětšeného povrchu žebry Exf a na poměru D_f/D_o . D_f je vnější průměr trubky i s žebry $D_f = D_o + 2 \cdot h_f$

$$Exf = h_f \sqrt{\frac{h_e}{k_{mf} t_f}} \quad (41)$$

k_{mf} je součinitel tepelné vodivosti žeber, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Výpočet maximální teploty materiálu trubek

Následující vztahy pro výpočet teploty trubek zahrnují faktory beroucí v úvahu nedokonalé rozdělení přenosu tepla okolo trubek.

Maximální teplota trubek T_m

$$T_m = (T_{bl} + \Delta T_f + \Delta T_m) [^\circ\text{C}] \quad (42)$$

T_{bl} je teplota media vystupujícího z počítané části konvekční sekce pece, $^\circ\text{C}$

ΔT_f je teplotní nárůst napříč vnitřní vrstvou media, $^\circ\text{C}$

ΔT_m je teplotní nárůst přes tloušťku stěny trubky, $^\circ\text{C}$

Výpočet rozdílů teplot ΔT_f a ΔT_m ve stínící sekci

$$\Delta T_f = \frac{(1.5 U (T_{bw} - T_{bl}) + \phi_s) A_o}{A_i h_i} [^\circ\text{C}] \quad (43)$$

$$\Delta T_m = \frac{(1.5 U (T_{bw} - T_{bl}) + \phi_s) A_o t_a}{A_i k_m} [^{\circ}\text{C}] \quad (44)$$

T_{bw} je jízková teplota spalin, $^{\circ}\text{C}$

U je celkový součinitel prostupu tepla, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ Pro stínící trubky závisí na T_{bw} a T_{bl} , pro všechny praktické výpočty platí výše zmíněný vztah (18).

ϕ_s je hustota tepelného toku na trubky, W/m^2

Výpočet rozdílů teplot ΔT_f a ΔT_m pro hladké trubky

$$\Delta T_f = \frac{1.5 U (T_{gl} - T_{bl}) A_o}{A_i h_i} [^{\circ}\text{C}] \quad (45)$$

$$\Delta T_m = \frac{1.5 U (T_{gl} - T_{bl}) A_o t_a}{A_m k_m} [^{\circ}\text{C}] \quad (46)$$

T_{gl} je teplota spalin na vstupu do počítané části konvekce, $^{\circ}\text{C}$

U je výše zmíněný celkový součinitel prostupu tepla, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$

Výpočet rozdílů teplot ΔT_f a ΔT_m pro trubky se zvětšenými povrchy

$$\Delta T_f = \frac{U' (T_{gl} - T_{bl}) A_o}{A_i h_i} [^{\circ}\text{C}] \quad (47)$$

$$\Delta T_m = \frac{U' (T_{gl} - T_{bl}) A_o t_a}{A_m k_m} [^{\circ}\text{C}] \quad (48)$$

U' je místní celkový součinitel prostupu tepla, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$

Místní součinitel celkového prostupu tepla U'

$$U' = \frac{1}{\frac{1}{h'_o} + \frac{A_o}{A_i h_i} + \frac{A_o t_a}{A_m k_m}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (49)$$

h'_o je místní součinitel přestupu tepla pro zvětšené povrchy, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Místní součinitel přestupu tepla pro zvětšené povrchy h'_o

$$h'_o = \frac{h'_e (E' A_e + A_b)}{A_o} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}} \right] \quad (50)$$

h'_e je místní součinitel přestupu tepla závislý na T_{gl} , $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Pro trny platí: $h'_e = 6 \cdot h_e$

Pro žebra platí: $h'_e = 4 \cdot h_e$

E' je místní faktor účinnosti zvětšených povrchů, -

Faktor účinnosti E'

Platí pro něj stejné závislosti jako pro obecný faktor účinnosti E (viz výše), avšak pro výpočet jsou použity korigované místní součinitele zvětšeného povrchu, a to jak pro součinitel trnů Exs' , tak i pro součinitel žebor Exf' .

$$Exs' = h_s \sqrt{\frac{h'_e}{k_{ms} d_s}} \quad (51)$$

$$Exf' = h_f \sqrt{\frac{h'_e}{k_{mf} t_f}} \quad (52)$$

Výpočet maximální teploty konců trnů nebo žebor T_t

$$T_t = (T_{g1} - E''(T_{g1} - T_m)) [^\circ\text{C}] \quad (53)$$

E'' je místní teplotní faktor zvětšených povrchů, -

Místní teplotní faktor zvětšených povrchů E''

Pro trnované trubky lze vypočítat z funkční závislosti faktoru účinnosti na místním součiniteli zvětšeného povrchu trny Exs' . Jedná se o jinou funkci než u předešlých faktorů pro trny [2].

Pro žebrované trubky platí závislost faktoru účinnosti na místním součiniteli zvětšeného povrchu žebry Exf' a na poměru D_f/D_o . Funkční závislost je opět jiná než u předešlých faktorů pro žebra [2].

Upravené rovnice přestupu tepla

Jsou to rovnice získané řešením soustavy rovnic tvořené základními bilančními rovnicemi pro spaliny (54) a pro medium (55) a rovnicí celkového přestupu tepla (16). Ta je doplněna o vztah pro střední teplotní logaritmický spád mezi spalinami a procesním mediem (17).

Výsledkem jsou dvojice rovnic. První dvojice je pro výpočet výstupní teploty spalin ze sekce T_{g2} a výstupní teploty media ze sekce T_{b1} . Druhá dvojice je pro výpočet výstupní teploty spalin ze sekce T_{g2} a vstupní teploty media do sekce T_{b2} [2].

Bilanční rovnice přenosu tepla

Pro spaliny:

$$Q = W1 (T_{g1} - T_{g2}) [W] \quad (54)$$

Pro medium:

$$Q = W2 (T_{b1} - T_{b2}) [W] \quad (55)$$

T_{g1} je teplota spalin na vstupu do sekce, $^\circ\text{C}$

T_{b1} je teplota media vystupujícího ze sekce, $^\circ\text{C}$

T_{g2} je teplota spalin na výstupu ze sekce, $^\circ\text{C}$

T_{b2} je teplota media na vstupu do sekce, $^\circ\text{C}$

$W1$ je součin tepelné kapacity spalin a hmotnostního toku spalin W_f , $W/^\circ\text{C}$

$W2$ je součin tepelné kapacity media a hmotnostního toku media, $W/^\circ\text{C}$

První sada rovnic:

$$T_{g2} = \frac{-W1 T_{gl} e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} + W2 T_{bl} e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} + W2 T_{gl} - W2 T_{bl}}{e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} (-W1+W2)} [^{\circ}C] \quad (56)$$

$$T_{b2} = \frac{-W1 T_{gl} e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} + W2 T_{bl} e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} + W1 T_{gl} - T_{bl} W1}{e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} (-W1+W2)} [^{\circ}C] \quad (57)$$

Druhá sada rovnic:

$$T_{g2} = \frac{e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} W2 T_{b2} - W1 T_{gl} + W2 T_{gl} - W2 T_{b2}}{e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} W2 - W1} [^{\circ}C] \quad (58)$$

$$T_{bl} = \frac{W1 T_{gl} e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} + e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} W2 T_{b2} - e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} T_{b2} W1 - W1 T_{gl}}{e^{\left(\frac{(-W1+W2) UA}{W2 W1}\right)} W2 - W1} [^{\circ}C] \quad (59)$$

Komín

Účelem komína je vytvoření potřebného tahu, aby spaliny mohly proudit konvekční sekcí dostatečnou rychlostí, aby u hořáků byl potřebný podtlak, a aby nikde v peci nenastal přetlak, což by vedlo k unikání horkých spalin netěsnostmi ve stěnách pecí s dalekosáhlými následky jak pro stabilitu zařízení, tak pro bezpečnost obsluhy. Výšku komína pak mohou ovlivňovat ekologická hlediska. Rychlost spalin v komínu je třeba také posuzovat z řady hledisek jako tlaková ztráta, cenové aspekty, hlediska ekologická atd.

Konstrukční typy a druhy uspořádání

Komíny používané u procesních pecí se běžně vyrábí z oceli nebo z betonu. Komíny se umísťují na zem vedle pece nebo se upevňují nahoru na pec.

Komíny ukotvené na zemi

Komíny nižší než 75 m jsou obvykle vyrobeny z oceli, vyšší komíny jsou většinou z betonu. Komíny ukotvené na zemi se často používají pro více pecí. Je-li více pecí zapojeno na jeden komín a jedna má být odstavena, pak se musí zajistit, aby se tato pec oddělila od ostatních. To se docílí pomocí záslepek.

Pokud výška komínu závisí pouze na vytvoření požadovaného tahu, pak je tato výška vypočtena z největší tlakové ztráty v systému pecí. Pokud při odvodu spalin z pece do komína vzniknou přídavné tlakové ztráty a komín je navrhnut pro požadovaný tah, musí být komíny umístěné na zemi zvýšeny oproti komínům umístěným na peci o příslušnou tlakovou ztrátu.

Komíny ukotvené na peci

Komíny na peci se vždy vyrábí z oceli. Maximální výška z ekonomického hlediska je 45 až 60 m. Pokud je třeba stavět vyšší komín, je výhodnější zvolit komín ukotvený na zemi.

Odtahy do komínů

Odtah do komína je nutné umístit na každých 12 m podélné délky (délky trubek) konvekční sekce. Pro delší konvekční sekce, například na šachtových pecích, je třeba navrhnout více odtahů spalin. Je možné použít více komínů, nebo lze spaliny odvádět kouřovodem do jednoho komínu, který může být umístěn buď na zemi, nebo přímo na peci.

Průměr komínu

Průměr komínu je funkcí množství proudících spalin. Komíny se běžně navrhují pro rychlost spalin cca 7,5 m/s. Pokud se nejedná o existující komín se známými parametry, lze pro návrh uvažovat stejný průměr po celé výšce. Návrhové specifikace by měly uvést požadovaný vnitřní průměr komínu na výstupu. Průměr komínu mohou ovlivnit také následující úvahy:

Komíny umístěné na peci

Jsou-li spaliny vedeny přímo do komínu, jeho průměr by neměl být větší, než je vnější šířka konvekční sekce (asi o 300 mm větší než vnitřní šířka W_c). Pokud spaliny do komínu vstupují z kouřovodu, komín může mít průměr o trochu větší, než je vnější šířka konvekční sekce.

Požadavky na znečištění

Pokud je z ekologických důvodů požadována větší výška komínu, pak může být ekonomická rychlost proudění spalin vyšší než 7,5 m/s, protože se díky většímu tahu komínu může zvětšit tlaková ztráta. Místo větší výšky komínu může být požadována vyšší rychlost spalin. Je-li pro dosažení zvýšení rychlosti použit zúžený výstup z komínu (škrtidlo), tlaková ztráta může vytvořit na konci komínu přetlak, pokud je rychlost spalin vyšší než 7,5 m/s. Tím může dojít k poškození komínů z betonu nebo z cihel, a proto se v těchto případech požadují ocelové komíny. Je-li výstupní rychlost z komínu nižší nebo rovna 7,6 m/s, tlakové ztráty na výstupu jsou malé a efekt způsobený škrtidlem je možné zanedbat.

Minimální rychlost spalin v komínu

Při rychlosti proudění spalin nižší než 4,5 m/s může dojít ke zpětnému tahu, kdy je studený vzduch vtahován do komínu. Tato situace může podstatně snížit potřebný tah, proto by k ní nemělo dojít. Za mimořádných provozních podmínek pece (např. při nízkých výkonech) je tedy třeba udělat určitá opatření, aby se zabránilo zpětnému tahu. Jednou z možností je v těchto případech zvýšit přebytek vzduchu v peci. Tím je možné přiblížit se běžné provozní rychlosti spalin za cenu snížení účinnosti pece. Pokud je už při návrhu komínu známo, že bude třeba snižovat výkon pece, je možné upravit parametry komínu pro snížený výkon. Komín je pak navržen tak, aby rychlost spalin ani při nízkém výkonu pece neklesla pod 4,5 m/s. To může znamenat, že za normálního provozu bude rychlost spalin vyšší než 7,5 m/s, což je třeba kompenzovat zvětšením výšky komínu.

Program pro návrh konvekční sekce procesních pecí

Celková koncepce programu

V první fázi práce programu jsou zadávána vstupní data pro výpočet. Děje se tak v několika po sobě následujících formulářích. Současně jsou už v průběhu zadávání dat vypočteny některé hodnoty, které jsou následně ve formuláři zobrazeny. Tím se usnadní kontrola zadaných dat a případně volba některých parametrů. Po zadání všech vstupních dat je spuštěn optimalizační výpočet, který metodou úplného vyčíslení nalezne optimální řešení. Na závěr jsou výsledky vypsány do listu v sešitu.

První formulář slouží k zadání základních parametrů pece, přičemž je ihned po zadání všech parametrů dopočtena spotřeba paliva a hmotnostní tok spalin W_f . Je zde také nutné rozhodnout, na kolik částí bude pec rozdělena.

V následujícím formuláři je třeba zadat fyzikální vlastnosti ohřívaných medií a také jejich teploty a průtoky. Z těchto údajů je vypočten tepelný tok potřebný pro ohřátí jednotlivých medií.

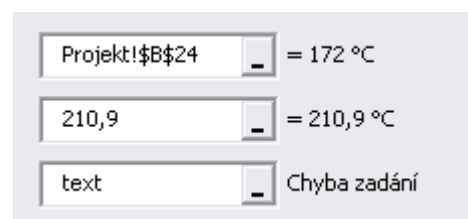
Ve třetím okně se volí celkové uspořádání pece. Pro jednotlivé části konvekce jsou přiřazována jednotlivá media; lze zde zvolit typ zvětšených povrchů a materiál, a to jak pro trubky v sekci, tak i pro zvětšené povrchy. Další rozměry každé části konvekce je třeba zadávat postupně ve zvláštním okně, kde jsou voleny jak parametry trubek, tak i zvětšených povrchů. Po zadání rozměrů je ihned zobrazena teplosměnná plocha a rychlost spalin v daném průřezu. Po potvrzení zadání a návratu na formulář uspořádání konvekce je pro zadanou část vypočtena tepelná bilance a jsou zde zobrazeny vstupní i výstupní teploty pro spočtenou sekci konvekce. Takto se postupuje od stínící sekce až k poslední sekci pece.

Po zadání parametrů všech částí konvekční sekce je možné buď vypsát výsledky bez optimalizace přímo podle zadaných rozměrů, anebo spustit optimalizační výpočet. Optimalizována je výška zvětšených povrchů (případně rozteč zvětšených povrchů) a počet trubek tak, aby bylo dosaženo požadovaného tepelného příkonu pro jednotlivá media za co nejnižší ceny trubek. Zároveň je kontrolována maximální dovolená teplota trubek i zvětšených povrchů; v případě potřeby je automaticky zvolen materiál z vyšší dovolené teplotou. Optimalizační procedura tedy v podstatě porovnává, zda je výhodnější zvolit méně trubek z lepšího (a dražšího) materiálu či naopak.

Manuál k použití programu

Před spuštěním výpočtového programu je nutné nejprve spustit MS Excel, ve kterém je celý program uložen. Po spuštění Excelu se mezi panely nástrojů objeví nový panel, který obsahuje jediný příkaz, a to ikonu kalkulačky. Kliknutím na tuto ikonu je program spuštěn. V případě, že se ikona nezobrazí, lze program spustit přes okno pro spouštění maker (Nástroje → Makro → Makra...). Spouštěcí makro je nazváno "Run". Po ukončení Excelu je panel nástrojů z lišty odstraněn, takže se při otevření běžného sešitu neobjeví.

Při spuštění programu se objeví první formulář, do kterého je třeba zadat vstupní parametry pro výpočet. Vkládání většiny vstupních dat se uskutečňuje přes formulářová okna. Všechny formuláře, do kterých je nutné zadávat numerické hodnoty, jsou přizpůsobeny pro načítání hodnot přímo ze sešitu. K tomu je použito místo standardních textových oken (Text Box) speciálních ovládacích prvků, které umožňují kliknutím minimalizovat formulář a dalším kliknutím vybrat v sešitu buňku, která obsahuje požadovanou číselnou hodnotu. Tento ovládací prvek se nazývá RefEdit Control. Do



Obr. 7 Ovládací prvek RefEdit

samotného okna tohoto ovladače je tedy možné buď vložit přímo požadovanou číselnou hodnotu (Obr. 7 druhý řádek), nebo číslo najít v sešitu a kliknutím vybrat. V druhém případě se v okně RefEditu zobrazí adresa buňky (Obr. 7 první řádek). Proto je ve formulářích vedle RefEditů umístěna popiska (Label), která vždy zobrazí příslušné číslo zadané do RefEditu a také jednotku zadávané hodnoty. Jednotky zadávaných čísel není možné změnit, a proto je třeba zadávanou číslici převést na jednotku uvedenou v popisce. V případě, že uživatel omylem zadá místo čísla textovou hodnotu, nebo se odkáže na buňku, která neobsahuje číslo, je v popisce zobrazeno upozornění; navíc nelze zadání potvrdit a přejít na k dalšímu formuláři (Obr. 7 třetí řádek). Stejné upozornění je zobrazeno i v případě, že je zadané číslo chybné: například záporná hodnota tepelné kapacity media, přebytek vzduchu menší než 1,0 a podobně.

Data, která uživatel zadá během chodu programu, jsou postupně po každém formuláři ukládána do textového souboru. Uložení právě zadaných dat proběhne po kliknutí na tlačítko “Dále”, které zároveň slouží k přechodu na další formulář. Při opakovaném výpočtu stejného projektu, kdy je třeba pozměnit pouze několik parametrů pece, je možné tato data po spuštění programu načíst kliknutím na ikonu “Otevřít” a zvolením příslušného uloženého projektu. Vstupní data jsou ukládána do automaticky vytvořeného textového souboru pod názvem projektu zadaným do kolonky “Název Akce” na prvním formuláři. Umístění textového souboru je totožné s umístěním sešitu s programem. V případě, že je následující projekt pojmenován stejně jako předchozí, je starý textový soubor se vstupními daty nahrazen novým. Pokud je program uprostřed výpočtu přerušeno, budou v textovém souboru uložena pouze data, jejichž platnost byla potvrzena v předchozích formulářích tlačítkem “Dále”. Textový soubor tedy bude možné načíst, ale data nebudou kompletní.

Formulář první – Parametry pece

Jak bylo řečeno výše, tento formulář se zobrazí po spuštění výpočtu. Pro opakování výpočtu dříve navrhované pece je možné všechna vstupní data vložit naráz otevřením textového souboru. Potom bude každý formulář po zobrazení už vyplněný, tedy pokud byl textový soubor kompletní.

V prvním formuláři (Obr. 8) je třeba zadat jméno projektu, pod kterým budou následně ukládána vstupní data. Dále je třeba zadat počet medií, která budou v konvekci ohřívána, a počet částí konvekční sekce. Zmíněnou část konvekční sekce tvoří několik řad trubek, které mají shodné rozměry, rozteče trubek a zvětšených povrchů, typ ohřívání media a všechny ostatní parametry. Konvekční sekci je tedy třeba rozdělit tak, aby při změně libovolného parametru vznikla nová část konvekce a nový parametr tím byl zahrnut do výpočtu. Výpočet pak probíhá od stínící části až do poslední zvolené části konvekce (viz také Obecný postup při návrhu konvekční sekce pecí). Jak počet ohřívání medií, tak i počet sekcí je nutné zadat v prvním formuláři; tyto zvolené počty už později nelze změnit.

Z radiační sekce je třeba znát radiační tepelný tok, který bude ohřívát první dvě řady stínících trubek (viz Teplo předané ve stínící sekci radiací Q_{sr}). Z geometrických parametrů je třeba zadat zvolenou celkovou délku konvekce.

Mezi další zadávané hodnoty patří jízková teplota spalin T_{bw} a komínová teplota. Kromě toho je třeba zadat složení spalin, aby bylo možné pomocí funkce SeansHeat vypočítat jejich tepelnou kapacitu pro různé teploty. K zadání složení spalin soužší další okno, kde lze jednotlivé komponenty vybrat z tabulky a následně zadat jejich obsah ve spalinách v objemových procentech.

Celkový hmotnostní průtok spalin je možné zadat přímo, pokud je znám předchozího výpočtu radiační sekce. Z veličin, které ovlivňují průběh spalování, pak stačí pro další výpočty vložit pouze molární procentuální obsah vodíku v palivu a přebytek vzduchu při spalování.

Jestliže průtok spalin znám není, program jej vypočítá. Postup je uveden v kapitole Rychlost spalin G_c . Kromě výše uvedených dat je ještě třeba zadat celkové teplo předané mediím, tepelné ztráty pece a typ a vlastnosti paliva. Pokud je spalován zemní plyn, zadává se jeho výhřevnost, pro topný olej se zadává hustota. Po zadání všech dat se zobrazí spotřeba paliva v kg/s, hmotnost spalin, které vzniknou spálením 1 kg paliva a hmotnostní tok spalin.

Teprve po zadání všech dat lze tlačítkem “Dále” pokračovat na další formulář.

Vstupní data - Parametry pece

Název Akce:

Počet sekcí: Teplo absorbované v celé peci, MW: = 31,46 MW

Počet medií: Tepelné ztráty pece, %: = 2 %

Vlastnosti spalin

Jízková teplota spalin, °C: = 819,8 °C Složení spalin

Teplota spalin vystupujících z konvekční sekce (Kominová teplota), °C: = 268,3 °C

Relativní množství spalin: 16,21 kg spalin/kg paliva

40	Nitrogen	71.09831285
45	Oxygen	2.845979687
48	Water	5.826516971
49	Argon	1.211025567
33	Carbon dioxide	19.01816492

Celkové množství spalin: 14,85 kg/s

Zadat celkové množství spalin přímo

Vlastnosti paliva

Typ paliva (kapalné, plynné): Spotřebované množství paliva: 0,916 kg/s

Přebytek vzduchu, -: = 1,15

Hustota kapalného paliva, kg/m³: = 1050 kg/m³

Procento vodíku v palivu, %: = 60 %

Parametry konvekční sekce

Střední tepelné zatížení z radiční sekce určující ozáření čel stínících trubek, W/m²: = 45056 W/m²

Světlná délka konvekční sekce, m: = 14,56 m

Obr. 8 Formulář první - Parametry pece

Formulář druhý – Ohřivaná media

Druhý formulář slouží k zadání všech parametrů, které se týkají se ohřivaných procesních medií. Podle dříve stanoveného počtu ohřivaných látek se pro každé medium zobrazí příslušná záložka. V každé záložce lze zvolit libovolný název media. Kromě toho se zadávají požadované vstupní a výstupní teploty media, jeho hodinový průtok trubkovým systémem a fyzikální veličiny pro určení součinitele přestupu tepla uvnitř trubek. Jsou to tepelná kapacita, tepelná vodivost a dynamická viskozita media. Závislost těchto veličin na teplotě je třeba zohlednit při jejich zadávání, v programu jsou pak s jistou chybou považovány za konstantní.

Z hlediska programu jsou media rozdělena na hlavní a externí, přičemž hlavní je medium, které prochází přes několik částí konvekce. V případě externího media se předpokládá, že do konvekce vstoupí a vystoupí ve stejné části. Externí medium tedy může procházet pouze

jednou částí konvekční sekce. Tomu je přizpůsoben iterační výpočet předaného tepla, který pro hlavní medium počítá jeho teplotu na vstupu do sekce a výstupní teplota je považována za pevnou. Pro externí medium je naopak počítána jeho výstupní teplota na základě teploty vstupní. Za hlavní medium je považována látka, která bude zadána na první záložce. Všechny ostatní záložky jsou určeny pro externí media.

Po zadání všech parametrů medií na všech záložkách se pro každé medium zobrazí tepelný příkon potřebný pro jeho ohřátí a je zpřístupněno tlačítko “Dále” pro pokračování na následující formulář.

Obr. 9 Formulář druhý - Ohřívání media

Formulář třetí – Uspořádání konvekční sekce

Toto okno obsahuje určitý počet rámečků odpovídající počtu sekcí konvekce. Pro každou sekci je možné zvolit medium, které se zde má ohřívat. Přidělení ohřívání medií k jednotlivým sekcím ovlivňuje mnoho jiných parametrů konvekce, a proto je třeba jejich uspořádání věnovat zvýšenou pozornost (viz Uspořádání konvekční sekce). Po zvolení media pro poslední sekci konvekce bude zobrazen teplotní spád mezi komínovou teplotou a teplotou media na vstupu do sekce. Při výpočtu této poslední sekce bude rozdíl teplot opraven podle vypočtených výsledků.

Dále se pro každou sekci zvolí, zda budou použity zvětšené povrchy, případně typ zvětšených povrchů (viz kapitola Teplosměnný povrch trubek). Výška a další rozměry zvětšených povrchů jsou zadávány ve formuláři konstrukčních parametrů sekce.

Pro trubky i pro zvětšené povrchy v sekci lze zvolit materiál. V případě, že bude v dalším výpočtu překročena dovolená teplota tohoto materiálu, bude automaticky zvolen materiál kvalitnější.

Seznamy materiálů

Materiály trubek, trnů i žeber lze vybírat ze seznamů, které jsou po spuštění programu načteny ze zvláštního listu. Dostat se na tento list je možné kliknutím na tlačítko “Přidat materiál” (Obr. 10 vpravo). Po stisku tlačítka bude zobrazen list nazvaný “Materiál”, který obsahuje tři vedle sebe umístěné seznamy materiálů určených pro trubky, trny a žebra. Seznamy materiálů je možné podle potřeby libovolně upravovat; materiály lze přidávat, mazat nebo upravovat jejich vlastnosti. Podmínkou je, aby pro každý materiál byla zadána kromě jeho názvu také teplota, do které lze materiál použít a tepelná vodivost materiálu. Pro potřeby optimalizačního výpočtu musí být zadána ještě cena materiálu v Kč za kilogram a hustota

materiálu za účelem přepočtu ceny na Kč/m³. Informace o materiálu tedy musí být kompletní; pokud nejsou, je materiál ze seznamu vyřazen. Mezi jednotlivými řádky v seznamu nesmí být mezera. Pokud je při načítání materiálů nalezena prázdná buňka, ukončí se seznam u předešlého materiálu. Naopak po vynechání řádku lze pod seznam zapsat libovolnou poznámku (při načítání nebude brána v úvahu). Pro další potřeby výpočtu bude seznam automaticky seřazen podle dovolené teploty materiálu. Po ukončení úprav v seznamech je možné vrátit se zpět k třetímu formuláři kliknutím na jedno z tlačítek “návrat k výpočtu”, která jsou umístěna mezi jednotlivými seznamy.

Vstupní data - Rozdělení konvekční sekce

Sekce č.1

Teplosměnné medium sekce	Typ povrchu trubek	Materiál trubek
<input checked="" type="radio"/> Hlavní medium 1 <input type="radio"/> Externí medium 1	<input checked="" type="radio"/> Hladký	<input checked="" type="radio"/> Uhlíkatá ocel <input type="radio"/> C - 1/2 Mo <input type="radio"/> 1+1/4 Cr - 1/2 Mo <input type="radio"/> 2+1/4 Cr - 1 Mo
Teplota media na vstupu 368,1 °C Teplota media na výstupu 373,8 °C	Teplo potřebné pro ohřev media 6534,4 kW Teplo předané v sekci 2917 kW	Cena trubek v sekci 868060,7 Kč

Zadáno

Sekce č.2

Teplosměnné medium sekce	Typ povrchu trubek	Materiál trubek	Materiál zvětšených povrchů
<input checked="" type="radio"/> Hlavní medium 1 <input type="radio"/> Externí medium 1	<input type="radio"/> Hladký <input checked="" type="radio"/> Trnovaný <input type="radio"/> Žebrovaný	<input type="radio"/> Uhlíkatá ocel <input checked="" type="radio"/> C - 1/2 Mo <input type="radio"/> 1+1/4 Cr - 1/2 Mo <input type="radio"/> 2+1/4 Cr - 1 Mo	<input type="radio"/> C - 1/2 Mo <input type="radio"/> 1+1/4 Cr - 1/2 Mo <input type="radio"/> 2+1/4 Cr - 1 Mo <input checked="" type="radio"/> 5 Cr - 1/2 Mo
Teplota media na vstupu 361 °C Teplota media na výstupu 368,1 °C	Teplo potřebné pro ohřev media 6534,4 kW Teplo předané v sekci 3605,8 kW	Cena trubek v sekci 920100,1 Kč Cena zvětšených povrchů v sekci 1642901,2 Kč	

Zadáno

Sekce č.3

Teplosměnné medium sekce	Typ povrchu trubek	Materiál trubek	Materiál zvětšených povrchů
<input type="radio"/> Hlavní medium 1 <input checked="" type="radio"/> Externí medium 1	<input type="radio"/> Hladký <input checked="" type="radio"/> Trnovaný <input type="radio"/> Žebrovaný	<input checked="" type="radio"/> Uhlíkatá ocel <input type="radio"/> C - 1/2 Mo <input type="radio"/> 1+1/4 Cr - 1/2 Mo <input type="radio"/> 2+1/4 Cr - 1 Mo	<input type="radio"/> Uhlíkatá ocel <input checked="" type="radio"/> C - 1/2 Mo <input type="radio"/> 1+1/4 Cr - 1/2 Mo <input type="radio"/> 2+1/4 Cr - 1 Mo
Teplota media na vstupu 153 °C Teplota media na výstupu 301,1 °C	Teplo potřebné pro ohřev media 566,4 kW Teplo předané v sekci 582,6 kW	Cena trubek v sekci 434030,4 Kč Cena zvětšených povrchů v sekci 45313,9 Kč	

Zadáno

Rozdíl teplot mezi teplotou spalin na výstupu z konvekční sekce a teplotou media vstupujícího do konvekční sekce: 115,3°C

Obr. 10 Formulář třetí – Uspořádání konvekční sekce

Po rozmístění medií do jednotlivých sekcí a zvolení zvětšených povrchů pro všechny sekce lze přistoupit k doplnění zbývajících konstrukčních parametrů jednotlivých sekcí. K tomu je určen formulář čtvrtý, který lze zobrazit pomocí tlačítka “Zadat”. To je umístěno pro každou sekci zvlášť v příslušném rámečku. Protože po zadání dat ve čtvrtém formuláři je spuštěn i výpočet pro určení tepla předaného v dané sekci konvekce, je nutné data do těchto formulářů zadávat postupně, od stínící sekce k sekci poslední. Po návratu k oknu s uspořádáním konvekce jsou v rámečku pro právě vypočtenou sekci zobrazeny jednak vypočtené teploty media na vstupu a výstupu z sekce, jednak vypočtený tepelný tok předávaný v sekci. Díky tomu je možné porovnat skutečný tepelný tok se zadaným. Je tomu tak proto, že tepelný tok, potřebný pro ohřev media na teplotu danou zadáním, je zobrazen už od spuštění třetího formuláře, respektive od přiřazení media k sekci. Stejně tak jsou už před spuštěním výpočtu sekce zobrazeny teploty media na vstupu a výstupu z sekce; avšak nejedná se o teploty vypočtené, ale zadané. Po vypočtení sekce jsou v jejím rámečku zobrazeny ještě ceny materiálu trubek a zvětšených povrchů, určené samozřejmě pro právě vybraný materiál;

pouhou změnou materiálu ovšem k přepočtení cen nedojde - k tomu je nutné opět otevřít a potvrdit formulář konstrukčních parametrů sekce.

Pokud je po výpočtení několika sekcí nutné udělat úpravu v rozmístění medií, je třeba výpočet opakovat znovu od první sekce. Stačí pouze postupně otevřít okna konstrukčních parametrů a následně potvrdit data v nich zadaná a to pro všechny sekce.

Po zadání a výpočtu všech sekcí je možné buď spustit celkovou optimalizaci (viz Celková optimalizace) nebo vypsát výsledky. Pokud bude spuštěn výpis výsledků (tlačítko "Dále"), nebudou už žádné parametry upravovány (například nedostatečný tepelný výkon špatně zadané sekce). Budou pouze vypsány výsledky už dokončených výpočtu a to do listu v sešitu (viz Výpis výsledků do sešitu v Excelu).

Pokud je spuštěna optimalizace, zobrazí se další okno, ve kterém je možné zafixovat pro některé sekce pevný počet trubek a pro zvětšené povrchy je možné pevně stanovit jejich rozteče. Pak je spuštěn optimalizační proces (viz kapitola Optimalizace výšky zvětšených povrchů). Po skončení optimalizačního výpočtu lze opět vypsát výsledky tlačítkem "Dále".

Formulář čtvrtý – Konstrukční parametry sekce konvekce

Tento formulář je třeba vyplnit pro každou počítanou část konvekční sekce. Zadává se do něj jednak uspořádání trubek a rozměry trubek sekce, jednak rozměry zvětšených povrchů, jsou-li použity. Zároveň je pro právě řešenou část konvekce možné spustit tzv. malou optimalizaci, která zvolí nejvýhodnější kombinaci délky zvětšených povrchů a počtu řad trubek.

Geometrické uspořádání trubek v sekci (Obr. 5) lze zadat pomocí čtyř parametrů. Jedním z nich je počet trubek v jedné horizontální řadě, která jde napříč toku spalin. Dalšími parametry jsou počet zmíněných řad trubek a počet chodů media v trubkách. V případě více než jednoho chodu je přírodní potrubí ohřívané látky rozděleno na více vstupů do konvekce a látka pak prochází sekcemi ve více oddělených prouděch (viz Počet chodů). Posledním parametrem je uspořádání trubek ve směru toku spalin. To může být buď zákrytové, tj. všechny trubky jsou v zákrytu za sebou, nebo trojúhelníkové, tj. každé tři trubky dvou po sobě jdoucích řad tvoří rovnoramenný trojúhelník; řady trubek jsou tedy přesazeny vždy o polovinu rozteče (viz Uspořádání trubek a jejich rozteče).

Dále je třeba zadat rozměry trubek, a to jejich vnější průměr a tloušťku stěny, vzájemnou rozteč trubek v řadě a jejich délku (viz Délka L_c). Kromě toho se zadává ještě šířka výstupků vyzdívky v sekci (viz Výstupky vyzdívky). Tím je v případě hladkých trubek zadáno vše.

V případě použití žebrovaných trubek ještě zbývá zadat výšku žeber, tloušťku žeber a rozteč žeber. Pro trnované trubky se zadává délka a průměr trnů, počet trnů v řadě po obvodu trubky a počet řad trnů na metr délky trubky (viz kapitola Zvětšené povrchy trubek).

Po zadání všech položek jsou vypočteny geometrické parametry sekce a nejdůležitější z nich jsou zobrazeny přímo v dolní části formuláře (Obr. 11). Pro ohřívané medium je zobrazen průtočný průřez trubek a hmotová rychlost media v potrubí. Na dalším řádku je světlá šířka sekce vypočtená na základě rovnice (5). Šířku pece je také možné zadat přímo v případě, že je stanovena jiným způsobem. Pro kontrolu návrhu je zobrazen volný průtočný průřez pece a hmotová rychlost spalin. Kromě toho je vypsána velikost plochy povrchu trubek a pro zvětšené povrchy jsou zobrazeny velikosti dílčích ploch povrchu trnů či žeber a velikost povrchu trubek mezi nimi (viz Určení rozměrů sekce v konvekci)

Jakmile jsou zadány parametry sekce, lze buď pokračovat zpět na formulář třetí a zadávat další sekce, nebo pro danou sekci spustit optimalizaci. Optimalizační procedura je určena k volbě nejvýhodnější kombinace délky zvětšených povrchů a počtu řad trubek v počítané sekci. Přitom musí být splněn požadavek na tepelný výkon sekce a nesmí být překročena maximální teplota trubek nebo zvětšených povrchů (viz Malá optimalizace). V případě výpočtu s hlavním mediem je pro optimalizaci nutné zvolit požadovaný tepelný výkon a při výpočtu sekce se zvětšenými povrchy je možné povolit nebo zakázat změny rozteče žeber

případně počtu řad trnů na metr trubky. Po výpočtu se zobrazí nová výška povrchů, počet řad trubek a případně nová rozteč žebek (počet řad trnů).

Pro návrat na třetí formulář stačí kliknout na tlačítko “OK”. Tím je zároveň pro aktuálně nastavené parametry sekce spočten tepelný výkon. Při opakovaném otevření formuláře pro stejnou sekci jsou zadaná data znovu zobrazena.

Konstrukční parametry konvekční sekce

Sekce č. 2

Počet trubek v řadě, -

Počet řad, -

Počet chodů media, -

Uspořádání trubek

Vnější průměr trubek, mm = 141 mm

Tloušťka stěny trubek, mm = 8 mm

Vnitřní průměr trubek: 125 mm

Rozteč trubek, mm = 254 mm

Výška výstupků, mm = 0 mm

Teplosměnná délka trubek, m = 14,56 m

Průměr trnů, mm = 12,7 mm

Výška trnů, mm = 32 mm

Počet řad trnů na 1 m, - = 63

Počet trnů po obvodu trubky, - = 18

Počet trnů na 1 m délky trubek: 1134

Světlná šířka konvekce: 2159 mm

Zadat šířku konvekce přímo, mm:

Průtočný průřez trubek: 0,049087 m² Hmotová rychlost media v trubkách: 2773,738 kg/(m²*s)

Volný průtočný průřez pece: 12,0291 m² Hmotová rychlost spalin ve volném průřezu: 1,23 kg/(m²*s)

Plocha zvětšených povrchů: 556,126 m² Plocha trubek mezi zvětšenými povrchy: 104,592 m²

Celkový vnější povrch trubek včetně zvětšených povrchů: 660,718 m²

Obr. 11 Konstrukční parametry sekce konvekce

Výpočtové a optimalizační procedury

Výpočtové procedury a funkce jsou rozděleny do několika modulů. Žádná výpočtová procedura není ve zdrojovém kódu k formulářům. Modul “MVýpočet” obsahuje proceduru “geometry” určenou k výpočtu rozměrů jednotlivých částí konvekce, dále proceduru “TempMap”, která přiděluje teploty medií k určitým sekcím, proceduru “výpočet”, která vypočítá součinitel přestupu tepla uvnitř trubek a následně spustí proceduru “balance”. Kromě

toho je zde ještě procedura "FuelDemand" k určení spotřeby paliva (výpočet pro první formulář) a procedura "MatCost" k výpočtu cen materiálu pro trubky a zvětšené povrchy (a několik pomocných výpočtových procedur). Dalším modulem je "MBalance" obsahující proceduru "balance" pro vypočítání předaného tepla a několik pomocných procedur k tomuto výpočtu. Modul "OPTIMIZE" obsahuje vzájemně provázané optimalizační procedury. V modulu "MSensHeat" je funkce "SensHeat", která je určena pro výpočet měrné tepelné kapacity, případně pro výpočet měrné entalpie plynů. Tato funkce byla vytvořena prof. Ing. Josefem Kohoutkem, CSc. na základě podkladů v [11]. Je použita se svolením autora. Jedná se o verzi 0608. V programu tato funkce slouží pouze pro výpočet tepelné kapacity spalin. Všechny zbývající pomocné výpočtové procedury jsou v modulu "Module1".

Speciální funkci má modul "Deklarace", ve kterém jsou deklarovány a podrobně popsány všechny globální proměnné v programu. Zde jsou také popsána jednotlivá pole konstrukčních a procesních hodnot a také pole obsahující informace o mediích. Obecně lze říci, že každý řádkový index těchto dvourozměrných polí představuje určitý parametr, zatímco sloupcový index odkazuje na sekci konvekce, které se tento parametr týká. Tedy například $A_k(9,3)$ představuje konstrukční parametr 9. – teplosměnnou délku trubek pro třetí sekci. Díky tomuto uspořádání je možné značně zjednodušit zadávání i výpis těchto parametrů.

Ostatní moduly stejně jako Class moduly a formuláře obsahují funkce, procedury a události sloužící k obsluze formulářů a uživatelského rozhraní.

Určení rozměrů sekce v konvekci

Procedura s názvem "geometry" je v podstatě sestavená z na sebe navazujících vzorců. Je spuštěna vždy pro výpočet jedné ze sekcí konvekce. Vypočítává postupně vnitřní průměr trubek, průtočnou plochu trubek a hmotovou rychlost media v trubkách. Podle typu zvětšených povrchů se dále počítá celková plocha povrchu hladkých trubek (22) nebo plocha povrchu žebor (26) a plocha trubek mezi žebry (27) a nebo plocha povrchu trnů (24) a plocha trubek mezi trny (25). V případě zvětšených povrchů se pak obě plochy sečtou a vyjde celkový vnější povrch (21). V dalším kroku se počítá světlá šířka pece (5) a příčný průřez sekce ($Wc \cdot Lc$). V poslední části procedury je vypočten volný průtočný průřez v nejužším místě sekce a hmotová rychlost spalin v tomto průřezu. Volný průtočný průřez je ve stínící sekci dán vzorcem (4), pro hladké trubky mimo stínící sekci platí vzorec (6), pro trnované trubky lze použít vzorec (7) a pro žebrované trubky platí vzorec (8). Hmotová rychlost spalin mezi trubkami je dána podílem hmotnostního toku spalin a průřezu (1).

Tuto proceduru využívá čtvrtý formulář pro výpočet zobrazovaných geometrických vlastností právě zadávané sekce. Kromě toho je tato procedura využívána při optimalizaci, protože při změnách výšky zvětšených povrchů, počtu řad trubek a dalších rozměrů je třeba většinu počítaných parametrů opravit.

Iterační výpočet předaného tepla

Procedura nazvaná balance je určena především pro výpočet výstupní teploty spalin a vstupní, respektive výstupní teploty media v počítané části konvekční sekce. Kromě toho je vypočten i tepelný tok odváděný v dané sekci ze spalin do media. K proceduře je navíc přidán výpočet maximálních teplot trubek a zvětšených povrchů. Výpočet předaného tepla spouští optimalizační procedura a také čtvrtý formulář po potvrzení zadaných údajů. Při optimalizaci této proceduře vždy předchází výpočet rozměrů sekce.

Iterační výpočet předaného tepla je řešen v několika variantách. Postup výpočtu se liší jednak pro hlavní a externí medium (viz Uspořádání konvekční sekce) a také pro různé typy povrchů trubek. Protože použitý výpočetní algoritmus pracuje vždy s protiproudým chodem media a spalin, je vždy vstup media do sekce naproti vstupu spalin. Při výpočtu sekce

s hlavním médiem je tedy pro určení přestupu tepla použita výstupní teplota média a z rovnic je pak vypočtena teplota vstupní. Tento postup je nutný, protože výpočet konvekce začíná stínící sekcí, kde je známa teplota spalin na vstupu (tzv. jízková teplota). Pro hlavní medium jsou známy teploty na vstupu do konvekce a na výstupu z konvekce (kde medium přechází do radiace), ale teploty mezi jednotlivými sekcemi je třeba dopočítat. Proto lze při výpočtu stínící sekce použít jedině výstupní teplotu média (vstupní teplotu do radiace). Po vypočtení sekce se spočtená vstupní teplota média stává výstupní teplotou pro další sekci a výstupní teplota spalin je teplotou vstupní pro další sekci; výpočet pak může pokračovat.

Naopak pro výpočet sekce s externím médiem lze použít jak vstupní, tak i výstupní teplotu média, protože externí medium prochází vždy jen jednou sekcí konvekce. Vstupní teplota ohřivané látky je ve většině případů pevně dána, a proto výpočet přestupu tepla počítá s touto teplotou namísto teploty výstupní, která je pak vypočtena z rovnic.

Celý výpočet přestupu tepla je uzavřen v cyklu, protože tepelná kapacita spalin a některé další veličiny jsou závislé na teplotě spalin a na teplotě média v sekci. K výpočtu jsou použity střední teploty spalin i medií. Pro první cyklus je stanoven jednoduchý odhad, kdy je výstupní teplotě spalin přiřazena teplota vstupní. Obdobně je pro hlavní medium jeho vstupní teplotě přiřazena jeho teplota výstupní. Externí medium má obě teploty zadány. Po každém vypočteném cyklu jsou teploty opraveny a výpočet končí tehdy, když se teploty ze dvou po sobě jdoucích cyklů liší o méně než $0,1^{\circ}\text{C}$.

Postup výpočtu

Před spuštěním iteračního cyklu je vypočten součinitel přestupu tepla uvnitř trubek h_i podle Gnielinského rovnice (28). Také je vypočtena plocha trubek na vnitřním povrchu a na středním průměru.

V první části iteračního cyklu je určena tepelná kapacita spalin na základě složení a střední teploty spalin v počítané sekci. K výpočtu tepelné kapacity je zde použito funkce SensHeat. Pro další výpočet jsou stanoveny hodnoty součinu měrné tepelné kapacity a hmotnostního průtoku, a to jak pro spalinu $W1$, tak i pro medium $W2$. Tento součin má jednotku $\text{W}/^{\circ}\text{C}$.

V další části iteračního cyklu je vypočten součinitel přestupu tepla ze spalin na vnější povrch trubek. Postup se liší podle typu povrchu trubek. Pro hladké trubky je konvektivní složka součinitele přestupu tepla dána procedurou "alfaHT" (viz kapitola Součinitel přestupu tepla vně trubek (na straně spalin) h_o). Radiační složka součinitele přestupu tepla je pro stínící sekci zohledněna dále ve výpočtu jiným způsobem. Pro všechny ostatní sekce výpočet postupuje podle odstavce Radiační součinitel přestupu tepla pro hladké trubky h_r . Pro trnované nebo žebrované trubky je celkový součinitel přestupu tepla ze spalin na vnější povrch trubek určen podle odstavce Součinitel přestupu tepla na straně spalin h_o pro zvětšené povrchy, vzorce (38), (40) a (37) pro trny a (39), (41) a (37) pro žebra. Pak už lze vypočítat celkový součinitel přestupu tepla (18).

V této fázi jsou známy všechna parametry pro výpočet tepelné bilance a přestupu tepla. Pro tento účel jsou použity upravené rovnice. Při výpočtu sekce s hlavním médiem jsou použity rovnice (56) a (57). Při výpočtu sekce s externím médiem jsou použity rovnice (58) a (59).

Pokud se jedná o stínící sekci, je výsledná teplota média ještě upravena o podíl radiačního tepla předaného ve stínící sekci Q_{sr} (13) se součinem tepelné kapacity média a hmotnostního toku média $W2$. Tedy $Q_{sr}/W2$ [$^{\circ}\text{C}$]. Úprava je následující: v případě, že se jedná o hlavní medium, je počítána jeho vstupní teplota do sekce, a výše zmíněný podíl je od teploty odečten; v případě, že je v sekci externí medium, je počítána jeho výstupní teplota ze sekce, a podíl $Q_{sr}/W2$ je k teplotě přičten.

Poslední krok iterace spočívá v kontrole rozdílu teploty spalin z předchozí iterace a teploty spalin právě vypočtené. Je-li rozdíl menší než $0,1^{\circ}\text{C}$, iterace se ukončí. Výpočet pak pokračuje určením tepelného výkonu z tepelné bilance (55).

Maximální teploty trubek a zvětšených povrchů

V další fázi procedury jsou určeny maximální teploty trubek a zvětšených povrchů. Výpočet se opět liší podle typu povrchu trubek.

Pro stínící sekci je teplotní nárůst napříč vnitřní vrstvou media ΔT_f dán vztahem (43) a pro teplotní nárůst přes tloušťku stěny trubky ΔT_m platí vztah (44). Maximální teplota trubek je dána součtem teploty media na vstupu do sekce a obou teplotních nárůstů podle vztahu (42), který je pro všechny typy povrchu stejný.

Obdobné vztahy jako pro stínící sekce platí i pro ostatní hladké trubky. Jsou to vztahy (45) pro ΔT_f a (46) pro ΔT_m .

Pro zvětšené povrchy je výpočet složitější. Je nutné nejprve určit upravené součinitele přestupu tepla (viz Místní součinitel přestupu tepla pro zvětšené povrchy h'_o a Místní součinitel celkového prostupu tepla U'). Z těchto součinitelů je teprve možné vypočítat teplotní nárůsty v mediu ΔT_f (47) a napříč stěnou trubek ΔT_m (48). Z nich je vypočtena maximální teplota trubek (42).

Maximální teplota zvětšených povrchů je určena podle vztahu (53), pro který je třeba určit místní teplotní faktor zvětšených povrchů E'' (viz kapitola Výpočet maximální teploty konců trnů nebo žeber T_t).

Určením těchto teplot procedura končí.

Optimalizace výšky zvětšených povrchů

Tuto proceduru je možné spustit buď pro jednu sekci konvekce (malá optimalizace) nebo pro konvekci celou (celková optimalizace). V prvním případě bude zoptimalizována pouze právě počítaná sekce a k výpočtu budou použity výsledky z předchozích sekcí. Proto například při optimalizaci třetí části konvekce musí být první a druhá část navrženy správně, jinak bude výsledek optimalizace zkreslený. Naopak při optimalizaci celé konvekce budou postupně upravovány parametry všech sekcí (stínící sekcí počínaje). Proto bude celkový výsledek optimalizace lepší. Pokud je totiž například ve druhé sekci hlavnímu mediu předáno teplo za velmi výhodných podmínek, mohou být podmínky předávání tepla ve třetí sekci velmi nevýhodné a celkové investiční náklady na konvekci tak budou nakonec vyšší.

Optimalizace pracuje na principu úplného výpočtu všech smysluplných řešení a následném výběru nejlevnějšího z nich. Řešení, která nesplňují omezující podmínky, jsou při výpočtu přeskakována. Při výpočtu jsou nastavovány následující veličiny: počet řad trubek, výška zvětšených povrchů, rozteč zvětšených povrchů a použitý materiál trubek a zvětšených povrchů. Pro dosažení lepších výsledků by bylo vhodné upravovat ještě řazení medií do sekcí a typ zvětšených povrchů v sekci. Vzhledem k celkové náročnosti výpočtu tyto algoritmy nebyly do procedury zařazeny. Proto musí být uvedené parametry vhodně zvoleny uživatelem.

Omezující podmínky jsou: minimální a maximální výška zvětšených povrchů, dovolená teplota pro materiály trubek a zvětšených povrchů a především dodržení požadovaného tepelného příkonu pro každé medium.

Malá optimalizace

Jednotlivé varianty řešení při malé optimalizaci jsou tedy dány různými kombinacemi délky trnů a počtu řad trubek v sekci. Přitom jsou kontrolovány maximální teploty trubek a zvětšených povrchů a při jejich překročení je zvolen odolnější materiál. Překročení dovolené teploty většinou způsobí příliš vysoké trnování, respektive žebrování. V důsledku toho je na konci optimalizace porovnáván například návrh dvou řad trubek s výškou trnů 30 mm z legované oceli a tří řad trubek s výškou trnů 15 mm z uhlíkové oceli. Vzhledem k rozdílu cen materiálu bude druhá možnost výhodnější. Kromě výšky trnů nebo žeber je možné upravovat počet řad trnů nebo rozteč žeber (pokud to uživatel povolí). Tato úprava je ale

použita pouze pro zmenšení rozdílu mezi požadovaným a vypočteným tepelným výkonem sekce. Vypočtený tepelný výkon je ale vždy vyšší než výkon požadovaný.

Při malé optimalizaci sekce s externím médiem je požadovaný výkon dán ze zadání, avšak pokud sekcí protéká hlavní medium, je zřejmé, že zde nemůže být předáván výkon určený pro celou konvekci. Proto je v tomto případě nutné požadovaný výkon sekce před optimalizací zadat. V případě, že je počítána sekce s hladkými trubkami, není pro optimalizaci žádný prostor, a je pouze nastaven počet řad trubek na požadovaný výkon.

Postup při výpočtu malé optimalizace

1. Počet řad trubek se nastaví na jednu.
2. Výška trnů (případně žeber) se sníží na minimum a nastaví se nejlevnější (nejméně odolné) materiály pro trubky a zvětšené povrchy .
3. Pro tyto hodnoty jsou přepočítány rozměry sekce a je vypočten tepelný výkon sekce (procedury “geometry” a “balance”). Pokud není tepelný výkon dostačující, jsou zvětšené povrchy zvýšeny o 1 mm a cyklus se opakuje. Zároveň je v průběhu cyklu kontrolováno, zda nebyly překročeny dovolené teploty materiálu trubek a zvětšených povrchů. Pokud je dovolená teplota překročena, je vybrán odolnější materiál a výpočet pokračuje.
4. Celý tento cyklus je ukončen až v případě, že bylo dosaženo požadovaného tepelného výkonu (pokračuje se bodem 5.), nebo byla dosažena maximální přípustná výška zvětšených povrchů. V případě druhém je jasné, že požadovaného výkonu není možné dosáhnout s momentálně daným počtem řad trubek, a proto je jedna řada přidána a výpočet se vrací k bodu 2.
5. Pokud je uživatelem dovoleno měnit rozteče trnů, resp. žeber, a tepelný výkon sekce zbytečně příliš převyšuje požadovaný příkon media, jsou rozteče postupně zvětšovány, dokud se tento rozdíl dostatečně nezmenší.
6. Protože sekce vyhovuje z hlediska tepelného výkonu, jsou vypočteny náklady na materiál pro danou konfiguraci (výška trnů nebo žeber, materiály, počet řad trubek) a výsledky jsou uloženy.
7. Je přidána další řada trubek a výpočet se vrací k bodu 2.
8. Až je počet řad trubek příliš vysoký (tak, že trubky předají teplo i bez trnů), je výpočet ukončen a z úspěšných variant uložených v bodu 6. je vybrána varianta nejlevnější.

Celková optimalizace

Pracuje na stejném principu jako optimalizace malá. Zásadní rozdíl spočívá v přerozdělování tepelných výkonů sekcí s hlavním médiem. Zatímco v malé optimalizaci bylo nutné požadovaný výkon pro sekce s hlavním médiem zadat ručně, v celkové optimalizaci je výkon každé sekce postupně volen. Pro zvolený výkon je pak vždy dopočítán celý zbytek konvekce, a to stejným způsobem, jako při optimalizaci malé. Z výsledků je opět zvoleno nejvýhodnější řešení.

Postup při výpočtu celkové optimalizace

Začíná se od stínící sekce.

1. Pokud je v sekci externí medium, nebo se jedná o poslední sekci s hlavním médiem, pokračuje výpočet podle postupu v malé optimalizaci. Výsledné investiční náklady takto určené se uloží pro další porovnávání. Pokud se nejedná o poslední sekci, pokračuje se opět bodem 1. Jestliže byla vypočtena poslední sekce, pokračuje se bodem 7.
2. Pro hlavní medium mimo poslední sekci se počet řad trubek v právě počítané sekci nastaví na jednu.
3. Výška trnů (případně žeber) se sníží na minimum a nastaví se nejlevnější (nejméně odolné) materiály pro trubky a zvětšené povrchy .
4. Pro tyto hodnoty jsou přepočítány rozměry sekce a je vypočten tepelný výkon sekce. Dokud není dosaženo požadovaného tepelného výkonu pro medium, nebo nejsou

překročeny dovolené teploty materiálu trubek a zvětšených povrchů, či není překročena maximální výška povrchů, jsou zvětšené povrchy zvýšeny o 1 mm a cyklus se opakuje. V případě dosažení jednoho z výše uvedených omezení jsou vypočteny náklady na materiál pro danou konfiguraci (výška trnů nebo žeber, materiály, počet řad trubek) a výsledky jsou uloženy.

5. V případě dosažení povolených teplot materiálů nebo maximální výšky zvětšených povrchů pak výpočet pokračuje další sekci s momentálně spočtenými parametry od bodu 1.
6. V případě dosažení požadovaného tepelného výkonu se pokračuje bodem 8.
7. Protože byl splněn požadavek na tepelný výkon (pro všechna media), je jedno z řešení kompletní. K dalšímu se přikročí tak, že se upraví parametry nejbližší předcházející sekce s hlavním médiem. Pokud byl v bodě 4. cyklus ukončen z důvodu překročení maximální výšky povrchů, tak se zvýší počet řad trubek. V případě překročení teplot materiálu je zvolen materiál odolnější. Výpočet v sekci pokračuje bodem 4.
8. Výpočet tedy postupuje od první sekce k poslední a poté se opět vrací. Když se pak vrátí k první sekci a jsou zde vyčerpány všechny možnosti řešení, je výpočet ukončen. Ze všech řešení je opět vybráno řešení podle optimální ceny.

Z uvedeného postupu je zřejmé, že počet možných variant řešení je velmi vysoký. Celková optimalizace je tedy značně náročná (v porovnání s jinými aplikacemi MS Excel a VBA). Pokud budou pro konvekci se čtyřmi sekcemi uvažovány tři řešení na každou sekci, bude celkový počet řešení 81, ale například procedury pro určení rozměrů a předávaného výkonu sekce se spouští při každém zvýšení trnů, respektive žeber. Proto celý výpočet může trvat i několik minut.

Výpis výsledků do sešitu v Excelu

Je spuštěn až po ukončení třetího formuláře (tlačítko “Dále”). Je to poslední procedura, která v programu proběhne. Výsledky jsou vypsány do listu, který je pojmenován podle názvu projektu (viz Obr. 8 Formulář první - Parametry pece - Název akce). Pokud list neexistuje, je programem vytvořen. V opačném případě jsou výsledky vepsány do existujícího listu. Pokud jsou v listu nějaká data v oblasti zápisu výsledků, tak budou přepsána. Mezi výsledky jsou vypsána všechna vstupní data a všechny zásadní výsledky výpočtů. Kromě samostatných proměnných jsou vypsána i pole konstrukčních a procesních hodnot a také pole obsahující informace o médiích. Jednotlivé sekce ve výpisu polí procesních a konstrukčních hodnot jsou rozlišeny barvami, a to podle typu media, které danou sekci protéká.

Určení ceny materiálu

Pro potřeby optimalizačního výpočtu bylo nutné stanovit cenu trubkového systému, a to jak pro hladké trubky, tak i pro trubky se zvětšenými povrchy. Protože je obtížné zjistit konkrétní ceny u jednotlivých výrobců, a navíc by bylo nutné vytvořit model, který zohledňuje nárůst ceny s rostoucím průměrem trubek, výškou trnů apod., byl výpočet ceny maximálně zjednodušen. Vychází se ze zadání ceny materiálu v Kč/kg, která je pak přepočtena na cenu v Kč/m³. Při výpočtu ceny materiálu v každé sekci je podle rozměrů trubek vypočítán jejich objem, a ten je vynásoben právě cenou materiálu v Kč/m³. Stejně se postupuje i pro zvětšené povrchy, s tím, že pro výpočet může být použit jiný materiál. Součet těchto cen pak rozhoduje při výběru nejvhodnějšího řešení. Je zřejmé, že takto vypočtená cena je zatížena řadou chyb. Především nejsou uvažovány výrobní náklady na trubky, které mohou být zvláště při výrobě trubek se zvětšenými povrchy značné. Dále nejsou do ceny započítána kolena a případné další konstrukční prvky (ofukovače úsad). A v neposlední řadě nejsou brány v potaz náklady provozní (například způsobené tlakovými ztrátami v peci). Z toho

vyplývá, že zvolený model je pouze orientační a pro použití v praxi by musel být značně zdokonalen nebo přepracován. To však spadá mimo rámec této práce.

Ověřovací příklad

Výpočtové vlastnosti programu byly otestovány na výpočtu Šachtové pece pro vakuovou destilaci. Pro vyzkoušení výpočtu byly použity pouze dvě první sekce. Výpočet byl proveden pro následující zadaná data:

Množství spalin, kg/s		16,354	
Střední tepelné zatížení povrchu trubek v radiaci, W/m ²		32074	
Max.tep.zatížení 1. řady konvekce, W/m ²		65056	
Součinitel přebytku vzduchu za sekci		1,15	
Druh povrchu:	hladký	trny	trny
Medium	1	1	2
Délka konvekce, m	14,560	14,560	14,560
Sírka konvekce, m	2,194	2,194	2,194
Výstupky, m	0,000	0,000	0,000
Počet trubek v řadě	8,0	8,0	8,0
Počet řad	3,0	3,0	1,0
Ohřívaná délka trubek, m	14,560	14,560	14,560
Průměr trubek, m	0,141	0,141	0,141
Roztec trubek - příčná, m	0,254	0,254	0,254
Roztec trubek - podélná, m	0,220	0,220	0,220
Výška trnu, m	0,000	0,032	0,019
Průměr trnů, m	0,0000	0,0127	0,0127
počet trnů na m	0,0000	1280,0000	1024,0000
Hladká délka trubky, m	0,000	0,000	0,000
Tepelná vodivost zvětšených povrchů, W/m K	0	40	40
Vstupní teplota media, °C	361,0	361,0	153,0
Výstupní teplota media (požadovaná), °C	421,0	421,0	364,0
Absorbované teplo (požadované), MW	30,630	30,630	0,830
Množství media, kg/h	490160	490160	6690
Součinitel přestupu tepla v trubkách, W/m ² K	1140,0	1140,0	260,0
Tepelné ztráty, %	0,0	0,0	0,0
Počet chodů, -	4	4	2

Ve výsledkových tabulkách jsou vypsány hodnoty vypočtené programem (levý sloupec) a data určená při původním návrhu pece (pravý sloupec).

První sekce:

Pro stínící sekce v tomto výpočtu bylo uvažováno stejné tepelné zatížení jako pro povrch trubek v radiaci: 32074 W/m^2

	Data vypočtená	Data určená při návrhu
Vypočtená teplota media na vstupu, °C	369,09	367,1
Teplota media na výstupu, °C	373,80	373,8
Absorbované teplo, kW	2406,98	3,426
Hmotová rychlost spalin, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	1,05	1,056
Teplota spalin na vstupu, °C	819,80	819,8
Teplota spalin na výstupu, °C	741,44	650,9
Souč. přestupu tepla v trubkách, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	1140,00	1140
Vnější povrch hladkých trubek, m^2	154,79	155,119
Vnější povrch trubek vč. zvětš. povrchů, m^2	154,79	155,119
Vnější součinitel přestupu tepla, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	22,48	39
Součinitel prostupu tepla, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	21,94	37,7

Výpočtem bylo zjištěno, že pro první sekci neodpovídá množství předaného tepla. Proto nemohou odpovídat ani teploty spalin a medií ani další parametry. Chyba mohla vzniknout buď tím, že bylo do výpočtu dosazeno špatné tepelné zatížení stínících trubek a nebo vznikla při výpočtu součinitele přestupu tepla vně trubek. Vypočtený součinitel přestupu tepla vně trubek totiž odpovídá součiniteli, který byl při původním návrhu vypočten pouze pro konvektivní přenos tepla ($21,8 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$). Chyba by tedy mohla být ve výpočtu radiálního součinitele přestupu tepla.

Druhá sekce:

Protože výsledky z první sekce neodpovídají původnímu návrhu, byla vstupní data pro tuto sekci upravena tak, aby bylo možné výsledky s předchozím návrhem srovnávat.

	Data vypočtená	Data určená při návrhu
Vypočtená teplota media na vstupu, °C	360	361
Teplota media na výstupu, °C	367	367,1
Absorbované teplo, kW	3454	3,108
Hmotová rychlost spalin, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$	1,31	1,361
Teplota spalin na vstupu, °C	677	650,9
Teplota spalin na výstupu, °C	476	493
Souč. přestupu tepla v trubkách, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	1140	1140
Vnější povrch hladkých trubek, m^2	155	155,119
Vnější povrch trubek vč. zvětš. povrchů, m^2	669	669,524
Vnější součinitel přestupu tepla, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	30,6	110,8
Součinitel prostupu tepla, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	26,1	101

Výpočet v druhé sekci se zvětšenými povrchy vykazuje lepší výsledky, ale odchylka v předaném teple je stále značná. To může být způsobeno jednak nestejným zadáním (viz vstupní teplota spalin a výstupní teplota media), ale je pravděpodobné že je ve výpočtovém postupu další chyba, kterou se nepodařilo nalézt.

Závěr

Prvotním cílem této práce bylo ukázat možnosti využití Visual Basicu v technické praxi. Zejména se jedná o inženýrské úlohy, od automatizace rutinních operací až po nalezení optimálních řešení. Vytvořený program plní základní požadavky na zadávání dat, výpočetní procedury jsou přizpůsobeny pro několik různých výpočtových postupů a minimalizace investičních nákladů je uskutečněna pomocí optimalizační procedury, která pracuje na principu vyčíslování jednotlivých řešení. Základní cíl diplomové práce se tedy podařilo splnit.

Kromě toho má program implementované řešení základních chyb které mohou vzniknout při zadávání dat, otevírání uložených souborů apod. Program také umožňuje ukládat informace o materiálech pro trubky a zvětšené povrchy trubek používaných v konvekční sekci pece. Tyto informace jsou uloženy ve zvláštním seznamu a jsou použity pro každý nový výpočet. Uživatel si tak může vytvořit malou databázi a nemusí tyto informace opakovaně zadávat. Pro kontakt s uživatelem jsou použita převážně formulářová okna, která jsou však přizpůsobena vkládání dat ze sešitu. Všechny jmenované prvky byly vytvořeny za účelem dosažení většího komfortu práce.

Vytvořený program je určen k řešení konvekční sekce procesních pecí. Základní využití programu tedy spočívá ve výpočtu tepelného výkonu jednotlivých částí konvekce. Výpočet prostupu tepla, který je dán značným množstvím vztahů, v podstatě tvoří jednu ucelenou část programu. Tato část programu je pak využívána jednak přímo, a to právě při základním výpočtu se zadáním všech dat, ale může být využita i nepřímo procedurou optimalizační. Tato procedura může navrhnout nejekonomičtější řešení konvekční sekce pece volbou vhodné výšky zvětšených povrchů ve všech sekcích.

Snahou bylo vytvořit program co nejkompaktnější. Avšak vzhledem k rozsahu práce nebylo možné zařadit hydraulické výpočty a model pro stanovení investičních nákladů konvekční sekce sestává pouze z výpočtu nákladů na materiál trubek a zvětšených povrchů. Proto by pro využití v praxi bylo nutné tento model značně zdokonalit, což by vyžadovalo kromě další práce programátorské i vynaložení značného úsilí při získání cen materiálů, trubek, kolen a dalších prvků konvekční sekce.

Vypočtený příklad ukazuje, že je ve výpočtu přenosu tepla chyba, která značným způsobem ovlivňuje výsledky. Chybu se nepodařilo odhalit, avšak je pravděpodobné že se nalézá ve výpočtu součinitele přestupu tepla pro radiaci (případně ve výpočtu tepla předaného z radiace ve stínící sekci pece). Pokud by chyba nebyla odhalena, nebylo by možné program využívat, protože jak běžný kontrolní výpočet tak i optimalizační výpočet jsou na rovnicích přestupu tepla závislé.

Seznam použité literatury

- [1] Walkenbach J.: Excel 2003 Power Programming with VBA. Indianapolis, Indiana, USA: Wiley Publishing, Inc., 2004. 1057s. ISBN: 0-7645-4072-6
- [2] Technické podklady Ústavu procesního inženýrství VUT v Brně
- [3] Gnielinski V.: New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. Int. Chemical Engineering, 1976
- [4] VDI-Warheatlas, 7.Auflage 1994, sec. Gf1.
- [5] Doc. Ing. Zdeněk Jegla, Ph.D.: Přednášky Systémové inženýrství III - Nové trendy v návrhu a koncepci ohřevných trubkových pecí. Brno: FSI VUT, 2009, Zveřejněno: 20. 4. 2009
- [6] Katalog firmy TPS-Technitube Röhrenwerke GmbH: General catalogue Edition 2004 [online]. Dostupné z http://www.tpsd.de/Catalogues/Files/General_catalogue.pdf
- [7] Webové stránky firmy Askhar Precision Tubes Pvt. Ltd. [online]. Gujarat – India: 2009 [cit. 3. května 2009]. Dostupné z <http://www.aksharfintubes.com/>
- [8] Webová stránka Furnaces & Fired Heaters [online]. [cit. 7. května 2009]. Dostupné z <http://www.heaterdesign.com/design0.htm>
- [9] Webové stránky firmy Clyde Bergemann Power Group [online]. Wesel – Germany: 2004 [cit. 7. května 2009]. Dostupné z http://www.clydebergemannpowergroup.com/content_manager/go/ID/48904/dbc/24f431d2c40f28ebd73e5cfc975c94d8
- [10] Webové stránky firmy Pearson Software Consulting, LLC [online]. USA: 1999 Last updated: 20-February-2008 [cit. 17.5.2009]. Dostupné z <http://www.cpearson.com/excel/Events.aspx>
- [11] J. M. Smith, H. C. Van Ness: Introduction to chemical engineering thermodynamics, fourth edition, McGraw-Hill, 1987.
- [12] Webové stránky firmy Delfin Tubes, S. A. [online]. Gijón – Asturias, España: 2009. Last updated: 09-February 2009 [cit. 20.5.2009]. Dostupné z <http://www.delfintubes.com/lang/en/11-home>
- [13] Mr Satendra Singh and Mr Shyam Goyal: Fired heaters in chemical process industries [Online]. Singapore: Chemical and Process Engineering Centre, 2001. Last Modified on 5/12/2001 [cit. 21.5.2009]. Dostupné z <http://www.cpec.nus.edu.sg/myweb/newsletter/news11/FWE.html>

Seznam použitých symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
A	Plocha výměny tepla	m^2
A_0	Celkový vnější povrch trubek	m^2
A_b	Plocha odkrytých trubek	m^2
A_e	Plocha zvětšeného povrchu trubek	m^2
A_f	Volný průtočný průřez sekce	m^2
A_i	Vnitřní povrch trubek	m^2
A_m	Střední plocha trubky	m^2
C	Šířka výstupku vyzdívky	m
C_p	Tepelná kapacita media	J/(kg·K)
C_{p_s}	Tepelná kapacita spalin	J/(kg·K)
d	Průměr trnů	m
D_f	Vnější průměr trubky i s žebra	m
D_i	Vnitřní průměr trubek	m
D_o	Vnější průměr trubek	m
E	Faktor účinnosti zvětšeného povrchu	-
E'	Místní faktor účinnosti zvětšených povrchů	-
E''	Místní teplotní faktor zvětšených povrchů	-
ea	Přebytek vzduchu	-
Ex_f	Součinitel zvětšeného povrchu pro žebra	-
Ex_f'	Korigovaný součinitel zvětšeného povrchu pro žebra	-
Ex_s	Součinitel zvětšeného povrchu pro trny	-
Ex_s'	Korigovaný součinitel zvětšeného povrchu pro trny	-
F_1	Teplotní součinitel, závislý na průměrné teplotě spalin a stěny trubky	-
F_2	Rozměrový součinitel konvekční sekce	-
F_g	Celková spotřeba paliva	kg/s
FG	Množství spalin vzniklé spálením 1 kg paliva	kg paliva /kg spalin
F_i	Poměr ekvivalentních průměrů trnovaných trubek	-
G	Hmotová rychlost media proudícího trubkovým systémem	kg/(m ² ·s)
G_c	Rychlost spalin v konvekční sekci	kg/(m ² ·s)
HA_s	Množství tepla dostupné ve spalinách	MJ/kg paliva
h_c	Součinitel přestupu tepla pro konvekci	W/(m ² ·K)
h_e	Součinitel přestupu tepla pro zvětšené povrchy	W/(m ² ·K)
h_e'	Místní součinitel přestupu tepla	W/(m ² ·K)
h_i	Součinitel přestupu tepla na vnitřní straně trubky	W/(m ² ·K)
h_o	Součinitel přestupu tepla na vnější straně trubky	W/(m ² ·K)
h_o'	Místní součinitel přestupu tepla pro zvětšené povrchy	W/(m ² ·K)
h_r	Součinitel přestupu tepla pro radiaci	W/(m ² ·K)
h_p	Výhřevnost paliva	J/(kg·K)
h_f	Výška žeber	m
h_s	Výška trnů	m
K	Součinitel tepelné vodivosti media	W/(m·K)
k_m	Tepelná vodivost trubky	W/(m ² ·K)
k_{mf}	Součinitel tepelné vodivosti žeber	W/(m ² ·K)
k_{ms}	Součinitel tepelné vodivosti trnů	W/(m ² ·K)

K_S	Součinitel tepelné vodivosti spalin	W/(m·K)
L	Celková dráha media proudícího trubkovým systémem	m
L_b	Střední délka radiačního paprsku	m
L_c	Efektivní délka konvekční sekce	m
$LMTD$	Střední teplotní logaritmický spád mezi spalinami a procesním mediem	°C
N_c	Počet řad trubek v dané části konvekční sekce	-
N_p	Počet chodů media v systému trubek	-
N_t	Počet trubek v řadě	-
n_f	Rozteč žeber	m
n_r	Počet řad na metr trubky	-
n_s	Počet trnů v řadě po obvodu trubky	-
pr	Prandtlovo číslo	-
Q	Tepelný tok	W
Q_a	Teplo absorbované v celé peci	MW
Q_c	Celkové teplo absorbované v konvekční sekci s výjimkou tepla předaného z radiační sekce stínícími trubkám	W
Q_r	Teplo absorbované v radiační sekci	W
Q_s	Teplo předané ve stínící sekci	W
Q_{sc}	Teplo absorbované konvekcí ve stínících trubkách	W
Q_{sr}	Teplo absorbované radiací stínícími trubkami	W
Q_{tc}	Celkový výkon konvekční sekce	W
Q_{tr}	Celkový výkon radiační sekce	W
Q_z	Tepelné ztráty pece	%
S_R	Podélná (svislá) rozteč řad trubek	mm
S_T	Příčná rozteč trubek v řadě	mm
T_{bw}	Jízková teplota spalin	°C
T_s	Komínová teplota	°C
T_{b1}	Teplota media vystupujícího ze sekce	°C
T_{b2}	Teplota media na vstupu do sekce	°C
T_g	Střední teplota spalin	°C
T_{g1}	Teplota spalin na vstupu do sekce	°C
T_{g2}	Teplota spalin na výstupu ze sekce	°C
T_m	Maximální teplota trubek	°C
ΔT_f	Teplotní nárůst napříč vnitřní vrstvou media	°C
ΔT_m	Teplotní nárůst přes tloušťku stěny trubky	°C
t_a	Střední tloušťka stěny trubky	m
t_f	Tloušťka žeber	m
U	Celkový součinitel prostupu tepla	W/(m ² ·K)
U'	Místní celkový součinitel prostupu tepla	W/(m ² ·K)
$W1$	Součin tepelné kapacity spalin a hmotnostního toku spalin	W/°C
$W2$	Součin tepelné kapacity media a hmotnostního toku media	W/°C
W_c	Vnitřní šířka konvekční sekce	m
W_f	Hmotnostní průtok spalin v peci	kg/s
ϕ_s	Hustota tepelného toku na trubky stínící sekce	W/m ²
ϕ_{1-side}	Hustota tepelného toku při jednostranném ozařování	W/m ²
μ	Dynamická viskozita proudícího media	Pa·s
μ_s	Dynamická viskozita spalin	Pa·s

Seznam příloh

1. Program pro výpočet prostupu tepla a optimalizaci výšky zvětšených povrchů trubek.
K dispozici je v elektronické verzi diplomové práce.
2. Vybrané části zdrojového kódu programu, které se týkají výpočtové části programu.
K dispozici je v listinné i elektronické verzi diplomové práce.