

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav procesního a ekologického inženýrství

Ing. Ladislav Bébar, CSc.

**INOVAČNÍ PRVKY
V OBLASTI TERMICKÉHO ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ**

INNOVATIVE ITEMS IN THE WASTES THERMAL TREATMENT

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2004

KLÍČOVÁ SLOVA

odpady, spalování odpadů, termické zpracování odpadů, spalování odpadů, spalovny nebezpečných odpadů, navrhování spalovacích zařízení, zplyňování, čištění spalin, ochrana ovzduší

KEYWORDS

Waste, Waste incineration, Thermal treatment of hazardous wastes, Incineration, Hazardous waste combustors, Incineration facility design, Gasification, Flue gas cleaning, Pollution prevention

MÍSTO ULOŽENÍ PRÁCE

Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně
Oddělení pro vědu a výzkum
Technická 2
616 69 Brno

OBSAH

PŘEDSTAVENÍ AUTORA.....	4
1 ÚVOD	5
2 ZAŘÍZENÍ PRO TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ A ČIŠTĚNÍ SPALIN.....	6
2.1 Navrhování termického bloku spaloven odpadů	6
2.1.1 Režim spalování odpadů v rotační peci	6
2.1.2 Pracovní režim dohořivacího stupně	8
2.1.3 Celková energetická náročnost procesu termického zneškodňování odpadů.....	10
2.1.4 Optimální teplota spalování odpadů v rotační peci.....	12
2.1.5 Zásady pro volbu režimu spalování odpadů	12
2.2 Koncepce termické části spalovny odpadů využívající proces zplyňování.....	14
2.2.1 Princip posuzované alternativní koncepce termického zpracování odpadů.....	14
2.2.2 Experimentální ověření zplyňování odpadů.....	16
2.2.3 Případová studie srovnávající provozní podmínky spaloven pracujících v různém režimu.....	16
2.3 Zařízení pro utilizaci tepla a čištění spalin	18
2.3.1 Směšovací aparát nové konstrukce	19
2.3.2 Zásady pro navrhování zařízení pro čištění spalin.....	20
2.4 Emise oxidů dusíku a jejich snižování.....	21
2.4.1 Matematický model tvorby oxidů dusíku založený na experimentálních datech ...	22
2.4.2 Podmínky vzniku oxidů dusíku při spalování odpadů a možnosti jejich odstraňování.....	23
2.5 Použití odpadů jako alternativních paliv	24
3 ZÁVĚR.....	25
4 POUŽITÁ A SOUVISEJÍCÍ LITERATURA	26
5 ABSTRACT	32

PŘEDSTAVENÍ AUTORA



Ladislav Bébar se narodil 7. května 1944 v Brně. V roce 1967 ukončil studium na Chemicko-technologické fakultě Slovenské vysoké školy technické v Bratislavě v oboru zpracování ropy a petrochemie.

Po ukončení studia nastoupil do Výzkumného ústavu chemických zařízení v Brně (VÚCHZ). Ve VÚCHZ Brno, po roce 1989 transformovaném na inženýrsko-dodavatelskou organizaci VUCHZ, a. s., pracoval do roku 2000 postupně ve funkcích výzkumného pracovníka až vedoucího oddělení zaměřeného na vývoj pecních celků a hořáků, dále jako vedoucí autorizované skupiny pro měření emisí

a ve funkci procesního inženýra při projektování a dodávkách zařízení pro tepelné procesy, zejména spaloven průmyslových odpadů.

V letech 1971 až 1974 absolvoval postgraduální studium v oboru organické technologie a kinetiky chemických reakcí na Fakultě organické technologie VŠCHT Praha. Externí vědeckou aspiranturu absolvoval na katedře ropy a petrochemie Fakulty technologie paliv a vody VŠCHT Praha, kde v roce 1981 obhájil disertační práci na téma „*Hydrokrakování těžkých ropných frakcí*“.

V průběhu výzkumné činnosti ve VUCHZ Brno se podílel na řešení nebo byl řešitelem řady výzkumných úkolů jak v rámci státního plánu rozvoje vědy a techniky, tak oborových úkolů v oblasti zařízení chemických výrob, z nichž je možné jmenovat například výzkum a vývoj strojního zařízení pro hydrogenační zpracování těžkých ropných frakcí, jednotky pro pyrolýzu ropných frakcí, inovace zařízení pro katalytický reforming benzínu uskutečňovaný v nízkotlakém režimu, navrhování reakčních pecí pro proces parního reformování zemního plynu atd. Velmi frekventovanou oblastí prací jmenovaného bylo provozní proměřování chodu technologických souborů v chemickém průmyslu a na základě provedeného hodnocení navrhování modernizačních opatření. Tato činnost byla v 90. letech rozšířena o provádění autorizovaných emisních měření.

V rámci inženýrsko-dodavatelské činnosti VUCHZ, a. s. Brno se v 90. letech podílel jako procesní inženýr na přípravě, realizaci a uvedení do provozu sedmi zařízení sloužících k termickému zpracování odpadů (se zpracovatelským výkonem 100 kg/h až 4 t/h), jednoho provozního souboru k využití nízkopotenciálního tepla spalin při ohřevu spalovacího vzduchu (v rafinerii Kaučuk Kralupy) a po roce 2000 se podílel na přípravě a realizaci rekonstrukce moderní spalovny komunálního odpadu v ČR ke zvýšení účinnosti čištění spalin vedoucí ke snížení emisí dioxinů (TERMIZO, a. s., Liberec).

Od roku 2000 působí na Ústavu procesního a ekologického inženýrství (ÚPEI) Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, kde zajišťuje a prezentuje výuku předmětů *Aplikovaná chemie* (kombinované bakalářské studium), *Základy chemických výrob* (bakalářské studium) a *Aplikovaná fyzikální chemie* (magisterské studium na ÚPEI). Je vedoucím diplomových prací (18 studentů do června 2004) a také školitelem v doktorském studiu (4 doktorandi). Současně se věnuje teoretickému i praktickému výzkumu v problematice spalování odpadů a čištění vznikajících spalin.

Výsledky vědecké práce za čtyřleté období působení na pracovišti ÚPEI Fakulty strojního inženýrství (od roku 2000) publikoval jako autor resp. spoluautor v 19 příspěvcích v mezinárodních časopisech a na mezinárodních konferencích a v 8 příspěvcích na odborných akcích na národní úrovni. Za dobu své odborné činnosti zveřejnil asi 120 odborných prací a výzkumných zpráv.

1 ÚVOD

Procesy termického zpracování odpadních látek vytvářených ve výrobní i komunální sféře jsou nezbytnou součástí průmyslové činnosti. Těmito procesy se vedle podstatné redukce objemu dosahuje využití kalorického obsahu odpadů k výrobě tepelné a elektrické energie.

Z hlediska rozdělení odpadů podle jejich původu představuje rozhodující objem komunální odpad, jehož produkce v roce 2002 činila v ČR cca 2,8 mil. t. V současné době převažuje skládkování tohoto odpadu nad spalováním. Stávající instalovaný výkon tří tuzemských spaloven komunálního odpadu činí přibližně 650 kt/rok [1] s reálným využitím výkonu pod 60 %. Význam procesů termického zneškodňování odpadů v podmínkách ČR podle strategických dokumentů v oblasti životního prostředí a odpadového hospodářství by měl být výraznější. V souladu s trendy uplatňovanými v rámci Evropské unie, kde v současné době činí podíl spalovaných komunálních odpadů cca 22 % z vytvořeného množství [2], bude docházet i v ČR k postupnému omezování skládkování a zvýšení podílu spalovaného odpadu. Do roku 2020 je možné očekávat zvýšení požadavků na termické zneškodnění komunálních odpadů v množství trojnásobně až čtyřnásobně vyšším oproti roku 2000 [1]. V současné době je v ČR zneškodňováno spalováním ročně asi 60 kt zvláštních a nebezpečných odpadů, v horizontu roku 2020 se předpokládá požadavek na roční zneškodnění nebezpečných odpadů v objemu zhruba 70 kt/r [1].

Spalování odpadů je možné považovat za proces, který umožňuje dosažení recyklace části tepelné energie obsažené v odpadních látkách, tedy z energetického hlediska odpady představují určitou formu obnovitelných zdrojů energie (OZE). Ve srovnání s kalorickým obsahem biomasy, jejíž energetické využívání v současné době poskytuje zhruba 55 PJ/r [3], představují odpady sice hodnotu řádově nižší, ovšem nikoli zanedbatelnou. Lze stanovit, že kalorický obsah spalovaných odpadů v ČR v současné době odpovídá hodnotě 5 až 6 PJ/r, z čehož na nebezpečný odpad připadá asi 1 PJ/r, tj. 15 až 20 %.

Rozhodující podmínkou pro to, aby proces spalování odpadů mohl být posuzován jako *energetické využívání odpadů*, je splnění předpokladu, že velikost získané energie je větší než je množství energie, které je do celého technologického procesu nutné vložit. Pokud uvedená podmínka splněna není, jedná se o technologie vedoucí k odstraňování resp. zneškodňování odpadů za cenu dodatečného vložení energie do procesu. O posuzování energetické efektivity technologií určených k termickému zneškodňování odpadů jsou vedeny diskuse na úrovni technické i legislativní v orgánech Evropské unie, včetně Evropského soudního dvora, rovněž přístup národních orgánů členských států EU k této otázce není dosud sjednocen.

Záměrem habilitační práce nebylo analyzovat legislativní stránku souborů nařízení týkajících se termického zneškodňování odpadů, ale provést technickou diskusi k hlavním problémům, které je při návrhu zařízení pro termické zneškodňování odpadů s respektováním platných legislativních opatření nutno řešit. Habilitační práce je zaměřena na zhodnocení současného stavu v oblasti termického zpracování odpadů a formulování zásad pro navrhování strojního zařízení a provozování technologických celků zneškodňujících odpady, zejména s ohledem na energetickou náročnost různých variant technologického řešení spalování odpadů a diskusi opatření, jimiž lze energetickou náročnost předmětné technologie snížit resp. dosáhnout její inovaci. Práce obsahuje řadu nových prvků, jež jsou výsledkem výzkumu v dané oblasti.

2 ZAŘÍZENÍ PRO TERMICKÉ ZPRACOVÁNÍ ODPADŮ A ČIŠTĚNÍ SPALIN

2.1 NAVRHOVÁNÍ TERMICKÉHO BLOKU SPALOVEN ODPADŮ

Požadavkem na termický blok ve spalovnách tuhých a kapalných odpadů je dosažení vzniku konečných oxidačních produktů z hořlaviny obsažené ve spalovaném materiálu při minimálním nedopalu. Nové předpisy týkající se způsobu vedení technologického režimu spaloven odpadů a přípustných maximálních koncentrací škodlivých látek v plynných exhalacích a produktech čištění spalin [4, 5] přinesly oproti dřívější legislativě [6, 7, 8] řadu výrazných změn, z nichž lze poukázat na následující úpravy:

- Pro vedení procesu spalování odpadů již není direktivně předepsáno, zda se spalování má uskutečnit jednostupňově nebo dvoustupňově.
- Zůstává pouze závazná podmínka dodržení předepsané teploty spalin „za posledním přívodem spalovacího vzduchu“ minimálně 850 °C, resp. 1 100 °C (pro případ zpracování nebezpečných odpadů s obsahem chloru nad 1 % hm.).
- Doba zdržení spalin při předepsané teplotě je jednotně určena v trvání minimálně 2 s.
- Je vypuštěno ustanovení pro závazné dodržení obsahu kyslíku ve spalinách (minimálně 6 % obj. O₂ „za místem posledního přívodu spalovacího vzduchu“), které bylo nahrazeno požadavkem nepřekročení maximálního obsahu nespáleného uhlíku v tuhých zbytcích (max. 3 % hm. C v tuhých zbytcích, resp. ztráta žiháním max. 5 % hm.).
- Pro maximální obsah znečišťujících látek v plynných exhalacích byly v podstatě zachovány hodnoty již dříve vyžadované legislativou EU [6], předpisy ČR přijaté v roce 2002 tyto podstatně přísnější emisní limity přejaly [B1].

Je možné konstatovat, že uvedené úpravy z pohledu předchozích předpisů EU neznamenaají zmírnění požadavků na vedení procesu, z pohledu legislativy ČR se jedná o zpřísnění požadavků zejména na kvalitu exhalací a vznikajících zbytků. Praktické poznatky z provozování spaloven ukázaly, že pro zneškodňování nebezpečných odpadů je nutné zachovat posloupnost dvou spalovacích stupňů. Určitý přebytek vzduchu v dohořivacím spalovacím stupni (tj. sekundární spalovací komoře) je nezbytný k zajištění dokonalého vyhoření všech spalitelných látek a vzniku konečných oxidačních produktů, nicméně dodržení obsahu kyslíku na úrovni cca 6 % obj. může být i nadále chápáno jako doporučující opatření, neboť ani vysoký přebytek kyslíku není postačující podmínkou pro dosažení dokonalého vyhoření hořlaviny při nesprávně vedeném procesu spalování.

K uskutečnění prvního stupně spalování může sloužit stacionární spalovací komora nebo rotační pec, pro druhý dohořivací stupeň je používána stacionární komora opatřená hořáky spalujícími plynné nebo kapalné přídavné palivo.

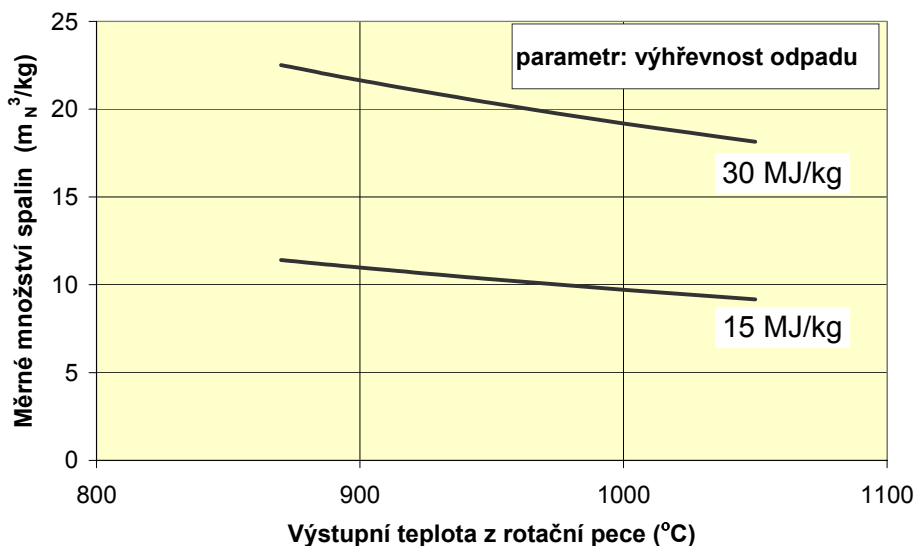
2.1.1 Režim spalování odpadů v rotační peci

Z hlediska vedení procesu v prvním termickém stupni se může jednat o režim oxidační, při kterém dochází ke spalování za dostatečného přebytku vzduchu, nebo o režim pyrolyzní, kdy dochází k nedokonalému rozkladu a spálení hořlavých podílů za nedostatku kyslíku. Způsob vedení termického rozkladu v prvním spalovacím stupni výrazně ovlivňuje koncepci celého technologického řešení spalovny. Spalovny pracující v oxidačním režimu používají obvykle pro první stupeň rotační pec, spalovny pracující v pyrolyzním režimu využívají pro první stupeň většinou stacionární komoru s roštovým topeništěm, nicméně pro tento účel může být využit rovněž reaktor s pohyblivým ložem nebo fluidní reaktor.

Spalování tuhých odpadů v rotační peci popisují rovnice hmotnostní a tepelné bilance zahrnující spalování hořlaviny obsažené ve zpracovávaném odpadu s proudem spalovacího plynu, jímž

může být předehřátý nebo nepředehřátý vzduch, eventuálně plyn obohacený kyslíkem. V tepelné bilanci je nutné uvažovat činnost podpůrného hořáku spalujícího přídavné palivo pro stabilizaci teplotního režimu při kolísání výhřevnosti odpadu, případně přívod rozprašovací páry při spalování kapalných odpadů. Ztráty tepla do okolí nepředstavují v tepelné bilanci rotační pece významnou roli, nicméně tuto položku je nutné uvažovat při výpočtu povrchové teploty pláště rotační pece a následně při stanovení celkového vysálaného tepla a jeho vlivu na pracovní prostředí.

Vzájemný vztah mezi měrným objemem vytvořených spalin a jejich teplotou na výstupu z rotační pece v závislosti na výhřevnosti zpracovávaného odpadu ilustruje obr. 1.



Obr. 1: Vzájemný vztah mezi měrným objemem vytvořených spalin a teplotou spalin na výstupu z rotační pece v závislosti na výhřevnosti odpadu [B2, B3].

Obrázek dokumentuje zjevnou skutečnost, že měrná tvorba vytvořených spalin při spalování odpadů je závislá jak na výhřevnosti spalovaného materiálu tak na požadované teplotě spalování. Dvojnásobné zvýšení výhřevnosti spalovaného odpadu se při dodržení konstantní teploty spalování v rozmezí cca 850 až 1 100 °C projeví zhruba dvojnásobným zvýšením měrného objemu vytvořených spalin, zvýšení spalovací teploty o 200 °C se projeví snížením měrného objemu vytvořených spalin asi o 20 až 25 %.

Dosažení relativně nízké spalovací teploty při spalování vysoce výhřevných odpadů je spojeno s přívodem vyššího množství spalovacího vzduchu (jímž se dosáhne snížení teploty spalování) a tudíž je doprovázeno zvýšenou tvorbou spalin. Pokud jsou spalovány kalorické odpady schopné bez použití přídavného paliva vytvořit spaliny o teplotě vyšší, než je v reálném případě dosahována, znamená práce „pod touto teplotou“ nežádoucí zvýšení objemu vytvořených spalin, které je nutno v dohořivacím stupni ohřát na požadovanou teplotu a dopravovat aparáty technologické linky až do komína. V takovém případě není účelné jakýmkoliv způsobem zvyšovat množství tepelné energie přiváděné do spalovacího prostoru. Toto konstatování se týká například předehřívání spalovacího vzduchu nebo provozu podpůrného hořáku na vyšší než minimální výkon.

Na druhé straně je zjevné, že při zpracování kaloricky chudých odpadů je pro dosažení určité teploty ve spalovacím stupni potřebné další teplo dodávat spalováním přídavného paliva nebo dalších výhřevných, například kapalných odpadních látek. Z předchozího konstatování vyplývá účelnost vedení procesu spalování odpadů již v prvním spalovacím stupni při co nejvyšší teplotě, kdy ještě není potřebné dodávat teplo spalováním přídavného paliva.

Praktické zkušenosti z provozu spaloven odpadů však ukazují, že teplotní režim rotační pece nelze volit libovolně. Komplikujícím faktorem pro provoz rotační pece je tvorba nálepu z anorganických zbytků vzniklých po spálení zneškodňovaných materiálů, jež uplývají na vnitřní stěně vy-

zdívky rotační pece. Intenzita vzniku nálepů ze zbytků spalování je závislá na charakteru spalovaných odpadů a složení nespalitelných látek vedoucích k tvorbě popelovin s nízkým bodem tání. Je známo, že depresi bodu tání popelovin způsobuje zejména přítomnost sloučenin alkalických prvků a prvků alkalických zemin [9]. Nálepy na vyzdívce rotační pece mohou vznikat poměrně rychle a mohou být natolik masivní, že vedou až k nutnosti odstavení spalovny z provozu nebo přerušení režimu spalování odpadů. Určitou obranou vůči vzniku nálepů může být zhotovení vyzdívky rotační pece s ochrannou vrstvou materiálu sklovitého charakteru, zejména však vedení procesu spalování v teplotním rozmezí mimo oblast vzniku polotekutých zbytků spalování. První možností je vedení procesu spalování odpadů v rotační peci při relativně nízkých teplotách (kdy nedochází ještě k tavení popelovin, *nonslagging regime*) nebo naopak, spalování je vedeno při vysokých teplotách, kdy se vytváří tavenina nespalitelných zbytků schopná kontinuálního výtoky z rotační pece (*slagging regime*) do uzávěru výpadové komory. Teplotní hranice mezi těmito režimy leží zhruba na úrovni 1000°C, nicméně je závislá na charakteru zpracovávaných materiálů.

Technologický návrh procesu by měl již v úvodní fázi vycházet ze stanovení režimu spalování, neboť tento moment výrazně ovlivňuje dimenzování aparátů celé technologické linky. Snaha o stanovení optimální teploty v prvním stupni spalování odpadů v závislosti na jejich vlastnostech je předmětem rozvah prezentovaných v habilitační práci. Tyto rozvahy respektují především energetickou náročnost procesu.

V praxi je velikost rotačních pecí spaloven tuhých a pastovitých odpadů navrhována na základě středního objemového zatížení vnitřního prostoru. Doporučované hodnoty objemového zatížení se nacházejí v dosti širokém rozmezí, zhruba od 100 kW/m³ do 400 kW/m³. Hodnoty objemového zatížení na úrovni cca 100 až 150 kW/m³ vycházejí z předchozích zkušeností autora [B4, B5] a odpovídají rotačním pecím pracujícím v režimu tvorby popele. Doporučované hodnoty tepelného zatížení uváděné v [10] na úrovni 250 až 400 kW/m³ vycházejí zřejmě z provozu rotačních pecí pracujících v tavném režimu.

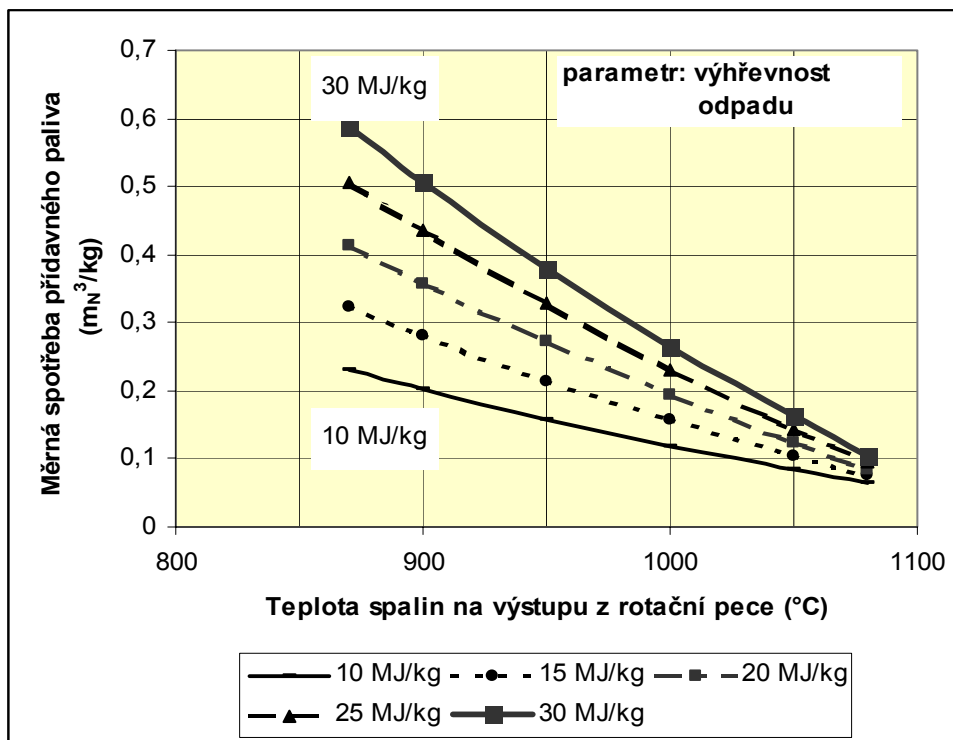
2.1.2 Pracovní režim dohořivacího stupně

Praxe ukazuje, že téměř dokonalý rozklad a tvorbu finálních oxidačních produktů je možné dosáhnout dvoustupňovým spalováním odpadů. I v případě, že první spalovací stupeň pracuje za přebytku kyslíku, obsahují vzniklé zplodiny spalování část nespálených podílů, zejména uhlovladiny a oxid uhelnatý. K dokončení spalování dochází v dohořivacím stupni po zvýšení teploty nad předepsanou mez provozem přídavného hořáku a po eventuálním přívodu dostatečného množství kyslíku. Pokud je spalování v prvním stupni vedeno za relativně nízké teploty se záměrem pracovat v režimu poskytujícím tvorbu sypkého popela, je nutné pro dosažení potřebné teploty v dohořivacím stupni spalovat vyšší množství přídavného paliva. Nároky na spotřebu přídavného paliva se zvyšují se snižující teplotou spalování v prvním stupni a s rostoucí výhřevností odpadu. Tuto situaci dokumentuje obrázek 2.

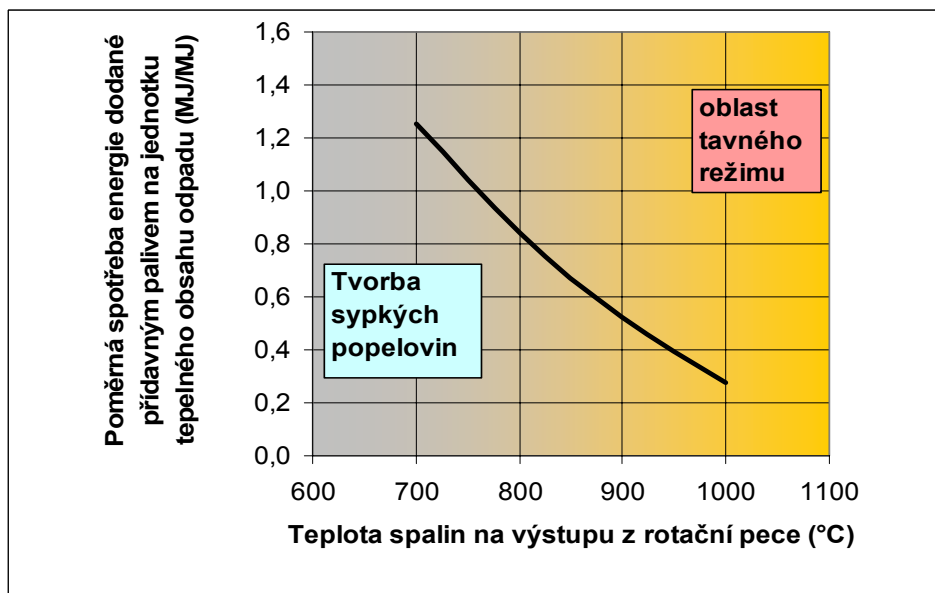
Energetickou náročnost dohořivacího stupně je možné vyjádřit poměrem tepelné energie dodané přídavným palivem vztažené ke kalorickému obsahu zpracovávaného odpadu. Obrázek 3 dokumentuje, že podíl tepla přivedeného do dohořivací komory přídavným palivem (eventuálně přehřátým spalovacím vzduchem), který je vztažen na jednotku kalorického obsahu zneškodňovaného odpadu, je prakticky nezávislý na výhřevnosti odpadu. Rozhodující vliv na tuto hodnotu má tudíž teplota spalování v rotační peci.

Dále je zřejmá skutečnost, že uskutečnění (vedení) procesu dvoustupňového spalování nebezpečných odpadů při relativně nízkých teplotách v rotační peci, kdy vznikají sypké popeloviny (například v teplotním rozmezí cca 750 až 800 °C), vyžaduje následné zvýšení teploty spalin v dohořivací komoře na úroveň 1 100 °C dodatečnou dodávku energie ve výši, která může dosáhnout 80 až 100 % kalorického obsahu zneškodňovaného odpadu. Je zřejmé, že vedení spalovacího procesu v rotační peci při teplotách pod bodem tavení popelovin sice snižuje problémy spojené se vznikem nálepů, je však spojeno s markantním vzrůstem spotřeby přídavného paliva.

Z uvedeného konstatování vyplývá logický závěr, že z hlediska spotřeby přídavného paliva je účelné pracovat při co nejvyšších teplotách spalování odpadů v rotační peci, tudíž v tzv. tavném režimu rotační pece.



Obr. 2: Závislost měrné spotřeby zemního plynu pro dosažení teploty 1 100 °C v dohořivací komoře na teplotním režimu rotační pece a výhřevnosti zpracovávaného odpadu [B6].



Obr. 3: Závislost měrné spotřeby tepla pro dosažení teploty 1 100 °C v dohořivací komoře na teplotním režimu rotační pece při dvoustupňovém spalování nebezpečných odpadů [B6].

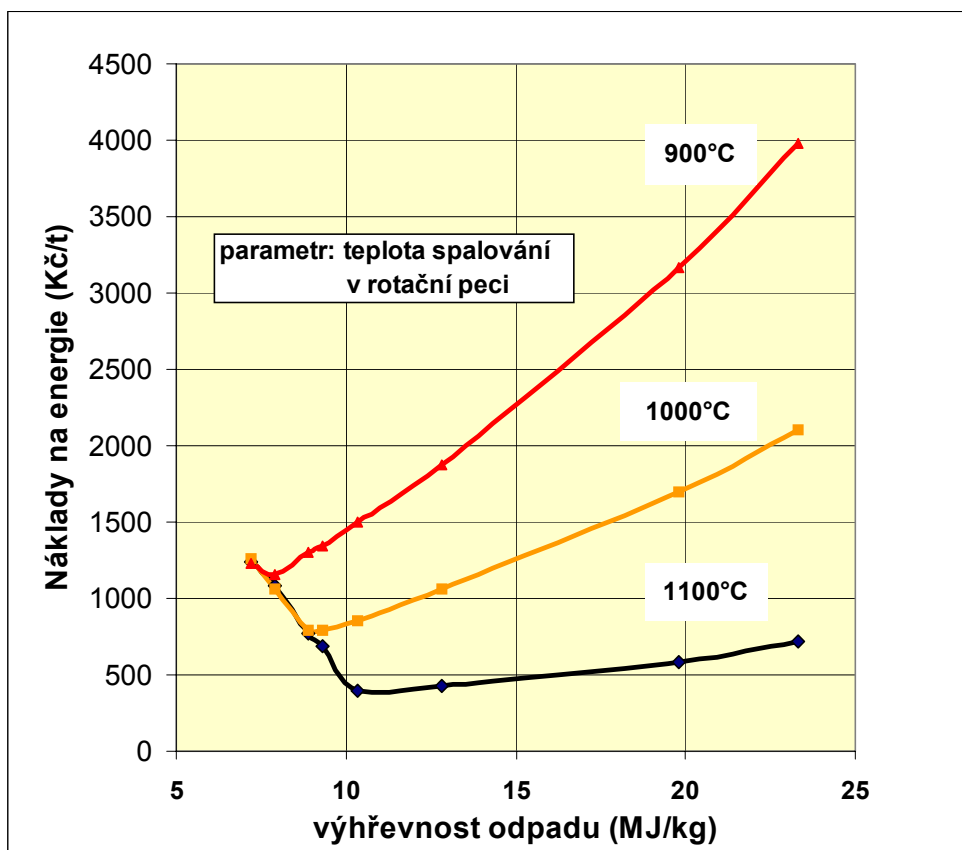
2.1.3 Celková energetická náročnost procesu termického zneškodňování odpadů

Energetická náročnost procesu termického zneškodňování odpadů je ovlivňována zejména dvěma položkami. Jedná se o výše diskutovanou spotřebu přídatného paliva a dále o spotřebu elektrické energie pro pohon ventilátoru sloužícího pro dopravu spalin ze spalovací části do komína. Do položky spotřeby energie ventilátorem se promítá teplotní režim spalování prostřednictvím vytvořeného objemu spalin a hydraulických odporů aparátů utilizace tepla, čištění spalin a potrubní trasy dopravy spalin. Příkon dalších spotřebičů elektrické energie (drtiče, čerpadla, dopravníky atd.) není prakticky závislý na režimu spalování zneškodňovaného materiálu.

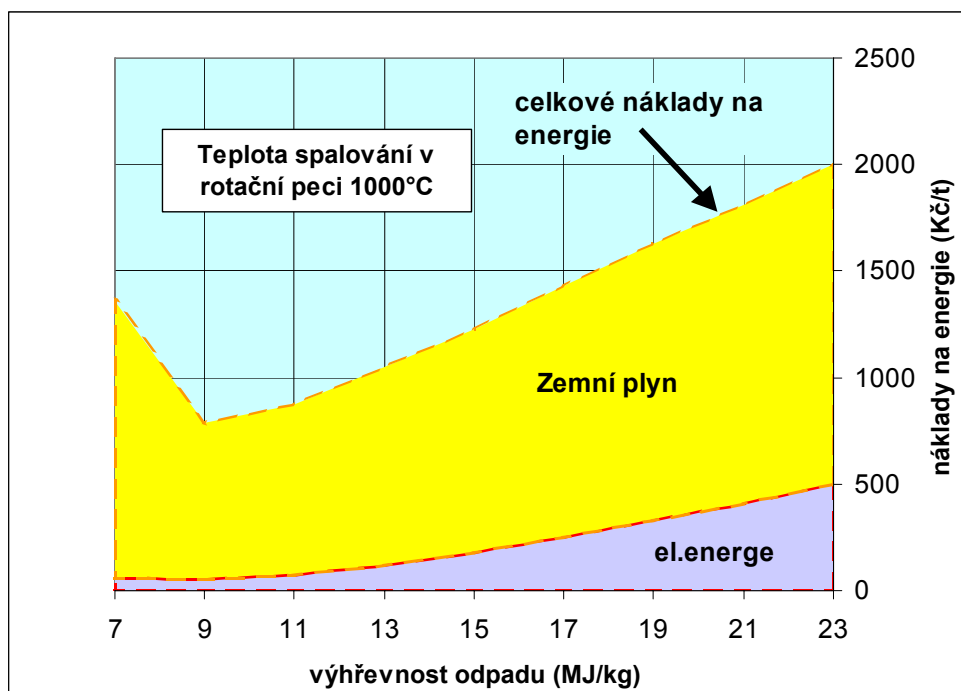
Pro ilustraci vlivu podmínek spalování v rotační peci na energetickou náročnost technologie termického zneškodňování odpadů různé výhřevnosti byly provedeny výpočty s využitím programu pro výpočet hmotnostní a energetické bilance spaloven popsáno v [B7, B8]. Byly uvažovány alternativy spalování odpadů proměnné výhřevnosti při různých teplotních úrovních v rotační peci. Teplota na výstupu z dohořovací komory byla uvažována 1 100 °C (v souladu s podmínkami pro zneškodňování nebezpečných odpadů s obsahem chloru nad 1 % hm.) a ve vytvořených spalinách byl dodržen doporučený obsah kyslíku minimálně 6 % obj. O₂.

Za aktuálně platných cenových relací byly vyhodnoceny náklady na energii zahrnující položky na přídatné palivo a elektrickou energii pro pohon spalinového ventilátoru. Obrázek 4 vystihuje závislost těchto nákladů na výhřevnosti zneškodňovaných odpadů a na teplotním režimu v rotační peci.

Lze konstatovat, že při dvoustupňovém spalování kaloricky chudého odpadu (například o výhřevnosti 7 MJ/kg) není z energetického hlediska účelné dosahovat v rotační peci teplotu vyšší než cca 900 °C, neboť teplo uvolněné spalováním takového odpadu nepostačuje bez provozu podpůrného hořáku rotační pece k dosažení požadované teploty. Naopak spalováním kaloricky bohatšího odpadu (např. s výhřevností 15 MJ/kg) lze teplotu spalování 1 100 °C i bez provozu podpůrného hořáku v rotační peci dosáhnout. Pokud bude takový odpad spalován v rotační peci jen při teplotě 900 °C, vzrostou náklady na hodnocené položky spotřeby energie téměř dvakrát oproti režimu spalování při teplotě 1 000 °C a zhruba čtyřikrát oproti režimu spalování při teplotě 1 100 °C. Příklad skladby nákladů v členění na přídatné palivo (zemní plyn) a elektrickou energii při určité teplotě spalování v rotační peci je uveden na obrázku 5.



Obr. 4: Závislost nákladů na energii při termickém zneškodňování odpadů při různé teplotní úrovni v rotační peci.



Obr. 5: Typická skladba nákladů na energii při spalování odpadů různé výhřevnosti při teplotě 1 000 °C v rotační peci a výstupní teplotě 1 100 °C z dohořivací komory.

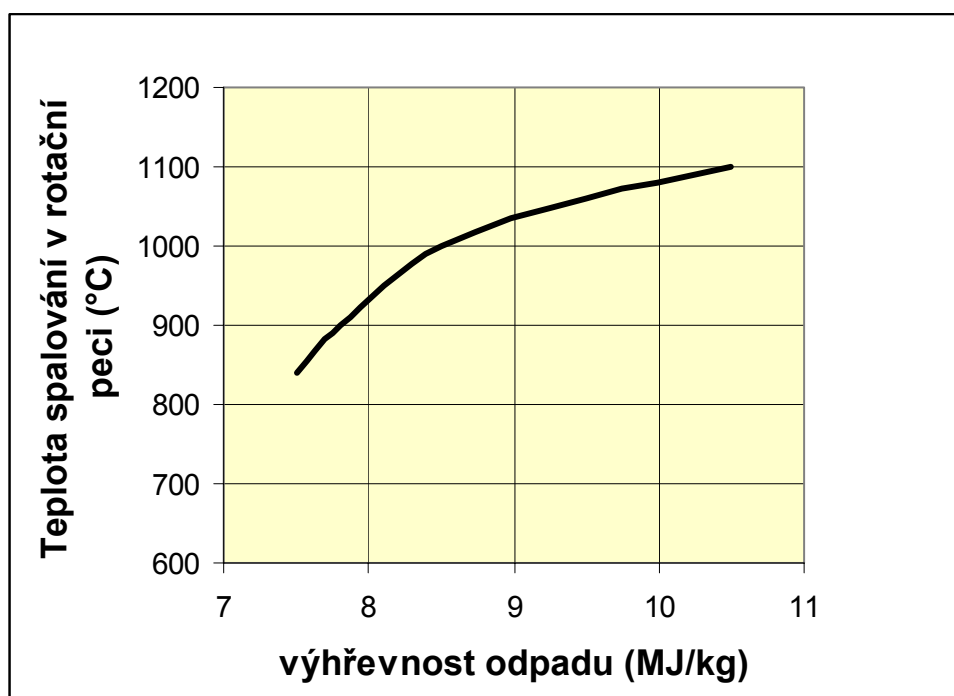
2.1.4 Optimální teplota spalování odpadů v rotační peci

Předchozí závěry vedou ke konstatování, že určité výhřevnosti odpadu odpovídá při dvoustupňovém zneškodňování jistá optimální teplota spalování v prvním spalovacím stupni (např. v rotační peci), která je dosažitelná spalováním odpadu bez zvýšeného výkonu podpůrného hořáku prvního spalovacího stupně a při které budou vznikat minimální náklady na přídavné palivo pro druhý dohořivací stupeň a elektrickou energii na pohon spalínového ventilátoru. Tato optimální teplota spalování v prvním stupni je vyznačena na obrázku 6. Uvedená závislost je zpracována pro režimy zneškodňování odpadu při teplotách v dohořivací komoře minimálně 1 100 °C (platí pro nebezpečné odpady s obsahem nad 1 % hm. Cl).

Pokud složení odpadů a kvalita konečných exhalací umožní pracovat v dohořivací komoře s teplotou pouze nad 850 °C (platí pro nebezpečné odpady s obsahem do 1 % hm. Cl), bude vhodné dosáhnout již v prvním stupni spalování teplotu blízkou požadované úrovni a v dohořivacím stupni provozem přídavného hořáku stabilizovat teplotní režim a dosažení dohoření všech spalitelných komponent.

Při změnách cenových relací pro energie může dojít k určité modifikaci zde uvedené závislosti, jejíž kvalitativní charakter však zůstane platný a vyjadřuje, že při zneškodňování odpadu s výhřevností cca 11 MJ/kg a vyšší se jeví účelné provádět spalování v prvním stupni v tavném režimu.

Je potřebné upozornit na okolnost, že v praxi vhodná teplota spalování závisí na charakteru spalovaného odpadu a vlastnostech zbytků spalování.



Obr. 6: Vyznačení oblasti optimálních pracovních teplot v rotační peci v závislosti na výhřevnosti odpadů pro dosažení minimálních nákladů na energii.

2.1.5 Zásady pro volbu režimu spalování odpadů

Je možné rekapitulovat hlavní zásady pro volbu režimu spalování při zneškodňování nebezpečných odpadů. Tyto zásady se zaměřením na zpracování nebezpečných odpadů se opírají o zkušenosti a know-how v oblasti výzkumu, projekce a realizace zařízení pro spalování odpadů.

- Při dodržení legislativních podmínek pro zneškodňování odpadů je žádoucí ve spalínách vystupujících z bloku spalování udržovat přebytek kyslíku, jehož koncentrace dle nových před-

pisů není sice legislativně určena, nicméně jako doporučenou koncentraci lze i nadále uvažovat 6 % obj. O₂.

- Režim spalování odpadů v prvním spalovacím stupni (dále např. v rotační peci) může výrazným způsobem ovlivnit strojně-technologické řešení procesu i provozní náklady.
- Volba teplotního režimu spalování odpadů v rotační peci není libovolná a je potřebné vyhnout se nebezpečné teplotní oblasti spojené se vznikem plastických a na vyzdívce ulpívajících zbytků spalování. Teplota přechodu popelovin do plastického stavu a taveniny závisí na složení odpadu. Při provozu rotační pece v tavném režimu s plynulým odtokem taveniny z nespálených zbytků musí být vyloučeny i krátkodobé teplotní výkyvy vedoucí k vzniku plastických zbytků a nálepů.
- Určité výhřevnosti odpadu odpovídá jistá optimální teplota spalování v rotační peci, kterou lze dosáhnout bez zvýšeného výkonu podpůrného hořáku prvního spalovacího stupně, přičemž náklady na palivo pro dosažení požadované teploty v dohořivacím stupni a náklady na dopravu spalin vykazují minimum.
- Uskutečňování spalování odpadu za nižších teplot v rotační peci, než je optimální teplota, je spojeno se vznikem vyšších nákladů na energie v důsledku vzniku většího objemu spalin vstupujících do dohořivací komory při nedostatečně vysoké teplotě.
- V případě nutnosti vedení režimu spalování odpadu v rotační peci při teplotách nižších než je tzv. optimální teplota, je z hlediska energetických nároků nevhodné jakékoliv další zvyšování dodávky tepla do rotační pece (např. použitím přehřátého spalovacího vzduchu, zvýšený výkon podpůrného hořáku, recykl teplých spalin, snižování tepelných ztrát pece atd.)
- Dosažení vyšší teploty spalování v rotační peci, než je optimální teplota, je z energetického hlediska vhodné v případě, že k jejímu dosažení není nutný provoz podpůrného hořáku prvního stupně spalování na zvýšený výkon.
- V případě nutnosti vedení režimu spalování odpadu v rotační peci při teplotách vyšších, než je tzv. optimální teplota, jsou z hlediska energetických nároků vhodná opatření vedoucí ke zvýšení dodávky tepla do rotační pece.
- Pro odpady s výhřevností vyšší než 11 MJ/kg byla pro aktuální cenově relace energií určena optimální teplota spalování v rotační peci vyšší než 1 100 °C. Pokud již při těchto teplotách bude ze zbytků spalování vznikat tavenina schopná plynule odtékat do výpádové komory, je možné pracovat v tavném režimu.
- Jelikož u převážné části průmyslových odpadů lze očekávat výhřevnost vyšší, než 11 MJ/kg, lze pro spalování těchto odpadů doporučit tavný režim.
- Diskutovaná souvislost energetických nároků při různých teplotních režimech rotační pece v procesu termického zneškodňování materiálu různé výhřevnosti má logický důsledek v nevhodnosti proměnlivé výhřevnosti odpadu, které se teplotní režim rotační pece nemůže operativně přizpůsobovat. Z toho důvodu je účelná homogenizace odpadů určených pro spalování s cílem dosažení dlouhodobě relativně vyrovnané výhřevnosti směsného materiálu dávkovaného do rotační pece.
- Výkonové dimenzování podpůrného hořáku rotační pece je nutné provést s ohledem na očekávané výkyvy ve výhřevnosti zpracovávaných odpadů, neboť podpůrný hořák musí stabilizovat teplotní režim při zpracování odpadů různé kvality. Výkonové předimenzování podpůrného hořáku není vhodné při zpracování vysoce výhřevných odpadů, neboť spotřeba paliva i při minimálním výkonu hořáku může nezanedbatelným způsobem ovlivnit hospodárnost provozu. Úplné odstavení podpůrného hořáku z provozu může být uskutečněno pouze za specifických podmínek, při spalování kapalných odpadů nelze z bezpečnostního hlediska tento zásah provést.
- Výkonové dimenzování hořákového systému prvního i dohořivacího stupně musí být provedeno s ohledem na schopnost dodržení náběhové teplotní křivky při uvádění zařízení do provozu.

- Zneškodňování uhlovodíků přítomných v plynných exhalacích je možné provést v jednom stupni, který může být čistě termický nebo katalytický. Spotřeba přídavného paliva k dosažení požadovaných pracovních teplot závisí na způsobu řešení rekuperace tepla s cílem dosáhnout její minimalizace. V tomto směru se jako výhodná jeví koncepce integrovaného reaktoru s rekuperačním výměníkem [11, 12, B9, B10].

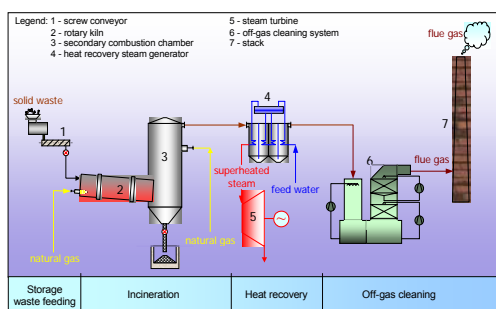
2.2 KONCEPCE TERMICKÉ ČÁSTI SPALOVNY ODPADŮ VYUŽÍVAJÍCÍ PROCES ZPLYŇOVÁNÍ

2.2.1 Princip posuzované alternativní koncepce termického zpracování odpadů

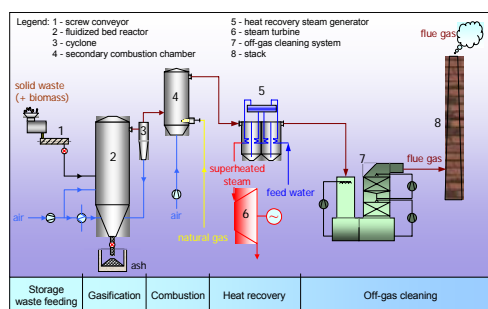
Se záměrem dosáhnout snížení spotřeb energií při procesu termického zneškodňování odpadů byla posouzena varianta spalovny využívající pro první stupeň termického rozkladu proces zplyňování [B6, B11–B26]. Je známo, že při zplyňování fosilních paliv, biomasy nebo jiných organických látek jsou za nedostatku kyslíku v reakčním prostředí záměrně vytvářeny podmínky pro vznik kaloricky bohatého plynu obsahujícího vedle CO_2 , H_2O a N_2 i spalitelné komponenty, zejména CO , H_2 , CH_4 a lehké uhlovodíky [13, B22–B24], přičemž. obvykle je dosahována výhřevnost cca 4 až 7 $\text{MJ}/\text{m}_\text{N}^3$. Proces zplyňování i konstrukce zplyňovacích reaktorů zaznamenaly v posledním období výraznou renesanci [14–18]. Reaktory s fluidním ložem se uplatňují například v technologii zplyňování biomasy k produkci kalorického plynu využitelného jako zdroj energie nebo pro výrobu dalších chemikálií [17, 19]. Určitou nevýhodou procesů zplyňování biomasy i různých odpadních látek je skutečnost, že surový produkční plyn obsahuje dehtové podíly, které přestože jsou kaloricky hodnotné položky, způsobují potíže v dopravních trasách zanášením potrubí a pohyblivých strojních částí. Tím obvykle vyvstává nutnost doplnit technologii energetického nebo chemického využití produkčního plynu o chlazení a čištění plynu od dehtovitých podílů a úletů tuhých látek [20].

Uvažovaná koncepce termického zpracování odpadů s využitím technologie zplyňování vychází z analýzy energetické náročnosti procesu dvoustupňového spalování nebezpečných odpadů a navazuje na poznatky získané experimentálním výzkumem při zplyňování biomasy na zařízení se zplyňovacím reaktorem [21–24]. Je dokumentováno, že snížení spotřeby přídavného paliva je možné dosáhnout využitím kalorického obsahu produktů zplyňování vznikajících v reaktoru prvního stupně, který je bezprostředně zaveden do dohořivacího stupně. Současně je možné předejít potížím spojeným se zanášením zařízení kondenzujícími dehtovými produkty tím, že produkty zplyňování jsou bezprostředně zavedeny do druhého dohořivacího stupně.

Srovnání koncepce klasické spalovny a technologie se zplyňovacím reaktorem je schematicky znázorněno na obr. 7. Technologie se liší režimem prvního stupně, který může být oxidační, resp. zplyňovací.



a) Klasická koncepce spalovny s rotační pecí



b) Koncepce spalovny s využitím zplyňovacího reaktoru

Obr. 7: Koncepce alternativního uspořádání spalovny.

Ze srovnání technologických variant a) a b) je patrné, že základní charakteristika navrhované koncepce spočívá v nahrazení rotační pece fluidním zplyňovacím reaktorem.

Je potřebné uvést, že uskutečnění termického zpracování odpadů v režimu pyrolýzního rozkladu a nedokonalého spalování materiálu v prvním stupni je technologií známou [25] a v řadě případů i v ČR využívanou pro nižší zpracovatelské výkony, obvykle v rozmezí cca 40 až 1 000 kg/h. Pokrok v konstrukci fluidních reaktorů umožňuje uvažovat s velkokapacitním zařízením pro zplyňování biomasy nebo odpadů [19]. Záměr pro využití procesu zplyňování pro termické zneškodňování odpadů podporují informace z roku 2002 o výrazném vzrůstu podílu pyrolýzních a zplyňovacích technologií při zpracování průmyslových a komunálních odpadů v Japonsku na celkovou kapacitu až cca 250 kt/r [26].

ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKY UVAŽOVANÉ KONCEPCE DVOUSTUPŇOVÉHO SPALOVACÍHO ZAŘÍZENÍ SE ZPLYŇOVACÍM REAKTOREM [B6, B13]:

- Jako první stupeň slouží fluidní zplyňovací reaktor, druhý stupeň je tvořen klasickou dohořivací komorou zajišťující spálení všech hořlavých podílů.
- Produkty zplyňování odpadů jsou bezprostředně zavedeny do dohořivací komory, čímž jsou eliminovány možné problémy vznikající při chlazení produktů zplyňování a kondenzaci dehtových podílů.
- K dosažení dokonalého shoření všech plynných produktů zplyňování je přidáno řízené množství vzduchu a hoření je iniciováno trvalým provozem stabilizačního hořáku dohořivací komory.
- Kalorický obsah produkčního plynu ze zplyňovacího stupně je dostačující k tomu, aby v dohořivací komoře byla dosažena teplota předepsaná předpisy pro termické zneškodňování nebezpečných odpadů (nad 1 100 °C) za dostatečného přebytku kyslíku.
- Využití tepelného obsahu spalin vzniklých v dohořivací komoře a jejich čištění může být provedeno běžně užívanými postupy.
- Podstatně nižší vzniklý objem finálních spalin umožňuje snížit velikost aparátů technologické linky pro utilizaci tepla spalin a jejich čištění.

OČEKÁVANÝ PŘÍNOS UVEDENÉHO ŘEŠENÍ SPOČÍVÁ ZEJMÉNA V NÁSLEDUJÍCÍCH MOMENTECH:

- Radikální omezení spotřeby přídatného paliva v dohořivacím stupni.
- Uskutečnění primárního štěpení zneškodňovaného materiálu v teplotní oblasti pod teplotou tavení popelovin (zhruba v rozmezí 800 až 950 °C).
- Snížení investičních nákladů aparátů v důsledku nižšího množství vznikajících spalin.
- Snížení spotřeby energie pro dopravu spalin.

SOUVISEJÍCÍ PROBLÉMY NUTNÉ K ŘEŠENÍ RESP. K OVĚŘENÍ:

- Úprava zpracovávaného odpadu zahrnující třídění přijímaného materiálu a jeho drcení na vhodnou velikost (zhruba pod 50 mm).
- Ověření výsledků procesu zplyňování různých druhů odpadů s nižší výhřevností (cca 10 až 20 MJ/kg) a ověření stability provozu fluidního zplyňovacího reaktoru a plynulosti odvodu vznikajících popelovin.
- Ověření podmínek dospalování v dohořivací komoře z hlediska eventuálního vzniku nálepů z prachových částic a spalovaných zbytkových uhlovodíků.
- Rozpracování postupu navrhování u fluidního zplyňovacího reaktoru pro vyšší zpracovatelské výkony.

2.2.2 Experimentální ověření zplyňování odpadů

Experimentální zkoušky zplyňování odpadů byly prováděny na poloprovodním zařízení, jehož základní částí je fluidní reaktor umožňující zpracovat do 40 kg/h podrcené dřevní hmoty, zemědělských odpadů apod. [21–23]. Průběh a výsledky zkoušek byly popsány v [B18, B21]. Jako surovina pro zplyňování sloužila modelová směs odpadů sestávající zejména z podrcených textilií a gumy, upravená drcením na velikost cca 10 až 20 mm. Základní pracovní podmínky a zjištěné výsledky jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1

Základní pracovní podmínky a výsledky zkoušek zplyňování modelové směsi odpadů

charakteristika	jednotka	hodnota
Dávkované množství suroviny	kg/h	15,8 až 21,6
Výhřevnost suroviny	MJ/kg	33
Teplota ve zplyňovacím reaktoru	°C	800 až 860
Zplyňovací poměr	m_N^3/m_N^3 *	0,17 až 0,25
Měrná tvorba produkčního plynu	m_N^3/kg	2,4 až 2,7
Výhřevnost produkčního plynu	MJ/ m_N^3	4,5 až 6,8
Složení produkčního plynu	H ₂	7,0 až 13,0
	CO	4,7 až 5,2
	CO ₂	10,2 až 10,7
	CH ₄	7,5 až 11,5
	uhlovodíky C ₂	1,0 až 2,0
	H ₂ O	4,0 až 5,0
	N ₂ +Ar	60 až 68

*...jedná se o poměr měrného množství zplyňovacího vzduchu k stechiometrickému množství vzduchu pro spálení hořlaviny obsažené v surovině. Při zplyňování nebyl použit přídavek H₂O

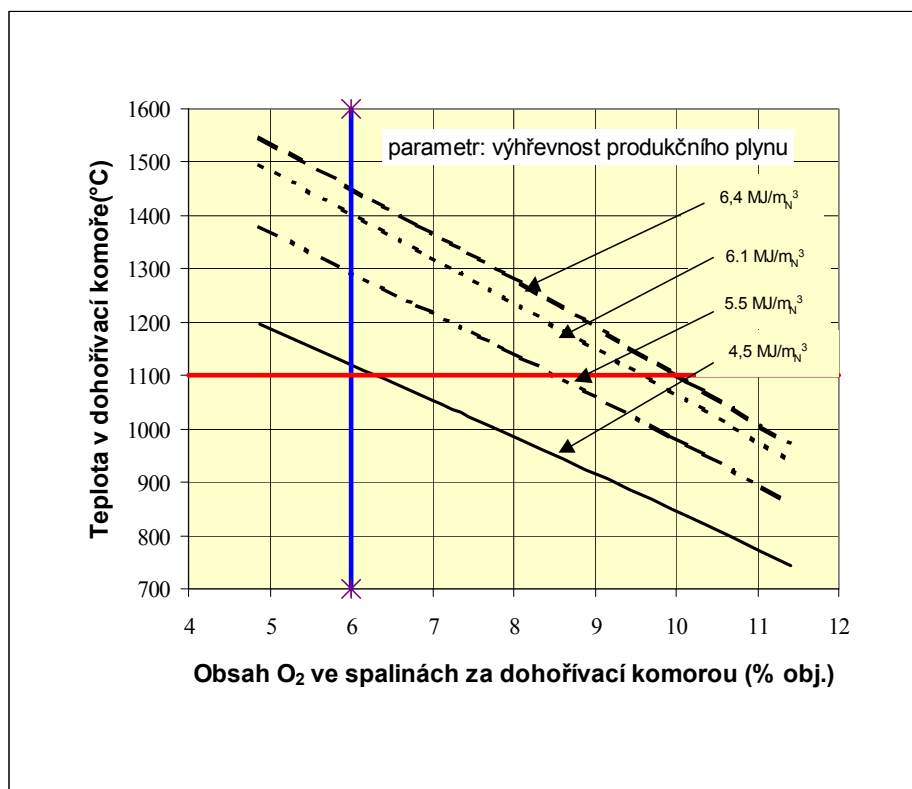
Zjištěné složení produkčního plynu, jeho kalorický obsah i měrná tvorba odpovídaly zhruba očekávání na základě experimentů s biomasou [24] i literárních informací [19, 27, 28]. Obsah metanu, který byl stanoven v rozmezí cca 7,5 až 11,5 % obj., byl vyšší, než při experimentech s biomasou (do 4 % obj.). Při pokračování výzkumných prací v tomto zaměření by bylo účelné ověřit podmínky zplyňování odpadních látek s nižší výhřevností a obsahujících větší množství cizorodých příměsí.

2.2.3 Případová studie srovnávající provozní podmínky spaloven pracujících v různém režimu

Poznatky z experimentálních zkoušek dovolily učinit závěry o alternativní konfiguraci spalovny odpadů uskutečňující dvoustupňové termické spalování a využívající pro první stupeň proces fluidního zplyňování. Je uvažováno s tím, že k plynu vystupujícímu ze zplyňovacího reaktoru bude přidáno potřebné množství vzduchu a provozem stabilizačního hořáku dohořivací komory dojde k iniciaci hoření vzniklé směsi a dosažení potřebné teploty spalin (nad 1 100 °C). Při hodnocení pracovních podmínek bylo respektováno rovněž hledisko dodržení doporučeného minimálního obsahu kyslíku ve vzniklých spalinách nad 6 % obj.

Vzájemný vztah mezi dosažitelnou teplotou v dohořivací komoře, obsahem kyslíku ve vzniklých spalinách a výhřevností plynu vznikajícího ve zplyňovacím reaktoru vyjadřuje obr. 8. Je vidět, že kalorický obsah plynu produkovaného v prvním stupni (s výhřevností na spodní zjištěné

úrovni, tj. $4,5 \text{ MJ/m}_N^3$) je již dostačující k tomu, aby po přidání regulovaného množství vzduchu a shoření všech spalitelných podílů byly v dohořivacím stupni získány spaliny o teplotě $1\,100 \text{ }^\circ\text{C}$ s obsahem kyslíku nad 6% obj. Se stoupající výhřevností plynu se zvyšuje dosažitelná teplota v dohořivací komoře resp. obsah kyslíku v konečných spalinách.



Obr. 8: Vzájemný vztah mezi dosažitelnou teplotou v dohořivací komoře, obsahem kyslíku ve vzniklých spalinách a výhřevností plynu vznikajícího ve zplyňovacím reaktoru [B6, B13].

Hodnocení pracovních podmínek spaloven odpadů klasické oxidační spalovny (obr. 7a) a v uspořádání se zplyňovacím reaktorem (obr. 7b) je podrobněji komentováno v [B6, B13, B17, B18]. V tabulce 2 jsou rekapitulovány hlavní zjištěné skutečnosti pro jednotný zpracovatelský výkon 10 kt/r kaloricky poměrně bohatého odpadu s výhřevností 33 MJ/kg . Z výsledků vyplývá výhodnost procesu využívajícího v prvním stupni termického zpracování odpadů technologii zplyňování, a to zejména ve spotřebě přídavného paliva a v objemu vzniklých spalin. Příznivé výsledky zjištěné pro varianty termického zpracování odpadů využívající proces zplyňování pro první stupeň byly ovlivněny zejména těmito faktory:

- Výrazně nižší měrná tvorba plynů v technologii využívající proces zplyňování.
- Kalorický obsah plynných produktů zplyňování je postačující k dosažení požadované teploty $1\,100 \text{ }^\circ\text{C}$ v dohořivací komoře a obsahu kyslíku ve spalinách nad 6% obj. bez dalších nároků na přídavné palivo, pokud je výhřevnost plynu ze zplyňování vyšší než $4,5 \text{ MJ/m}_N^3$ (tj. nad spodní hranicí experimentálně zjištěného rozmezí).
- Poměrně vysoká výhřevnost modelové směsi odpadů.

Výrazná redukce objemu produkovaných spalin (asi trojnásobné snížení) se následně promítá do snížení spotřeby energie pro pohon spalinového ventilátoru (asi na 50% hodnoty určené pro oxidační spalovnu) a podstatně nižší velikosti všech aparátů technologické linky, dokumentované v tabulce 2 např. na dvojnásobném a trojnásobném poklesu objemu dohořivací komory.

Měrná objemová výkonnost fluidního zplyňovacího reaktoru je ve srovnání s rotační pecí výrazně vyšší a při experimentálních zkouškách zplyňování byla dosahována objemová rychlost cca $450 \text{ až } 625 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{h}$, což je asi $30\times$ vyšší hodnota než činí objemové zatížení rotační pece.

Získané poznatky vedou k závěru, že technologie zplyňování může být využita k termickému zneškodňování odpadů především v případech, kdy se jedná o dvoustupňové spalování vyžadující dosažení rozkladné teploty nad 1 100 °C při zpracování odpadů, jež mohou být drcením upraveny na zrnitost vhodnou pro fluidní reaktor. Uvedené závěry potvrzují informace o rozšíření technologie zplyňování v Japonsku [26], kde v roce 2002 bylo takto zpracovááno denně cca 860 t průmyslových i komunálních odpadů.

Tabulka 2

Parametr	jednotka	Konfigurace termického stupně spalovny			
		rotační pec + dohořivací komora		zplyňovací reaktor + dohořivací komora	
Zpracovatelský výkon	t/h	1,43			
Výhřevnost odpadu	MJ/kg	33,0			
Pracovní teplota v 1. stupni	°C	900	1050	800	820
Výhřevnost plynu z 1. stupně zpracování	MJ/m _N ³	-	-	4,5	5,5
Měrná tvorba spalin v 1. stupni	m _N ³ /kg	24	19,5	2,5	2,5
Celková tvorba spalin za 2.stupněm	m _N ³ /h	34250	27880	3570	3570
Měrná tvorba spalin za 2. stupněm	m _N ³ /kg	28,9	20,7	8,7	9,7
Objem spalin za 2.stupněm	m _N ³ /h	41250	29500	12350	13900
Spotřeba přídavného paliva ¹	m _N ³ /h	602	142	12	12
Měrná spotřeba přídavného paliva	m _N ³ /kg	0,42	0,1	<0,01	<0,01
Teplota spalovacího vzduchu ve 2.stupni	°C	200		20	
Obsah O ₂ ve spalinách za 2. stupněm	% obj.	11,0	10,6	6,2	7,9
Minimální objem komory 2. stupně ²	m ³	118	84	36	40
Výroba přehřáté páry ³	t/h	19,2	13,8	5,7	6,8
Spotřeba elektrické energie na dopravu plynů	kWh/h	186	133	76	83

Poznámky: 1) Jako přídavné palivo uvažován zemní plyn o výhřevnosti 35,8 MJ/m_N³.

2) Minimální objem dohořivací komory stanoven pro zdržnou dobu 2 s.

3) Přehřátá pára o teplotě 400°C a tlaku 4,0 MPa.

Hlavní výsledky srovnání provozních podmínek technologických variant spalovny odpadů

2.3 ZAŘÍZENÍ PRO UTILIZACI TEPLA A ČIŠTĚNÍ SPALIN

Spaliny vystupující z dohořivací komory při teplotách 850 až 1 100 °C mají vysoký tepelný obsah a k využití jejich tepelného potenciálu dochází obvykle nepřímou cestou v aparátech sloužících k utilizaci tepla. Velmi častou formou využití tepla spalin je výroba přehřáté páry a následné generování elektrické energie při expanzi páry v protitlaké nebo kondenzační turbíně, které připadá v úvahu převážně u jednotek s vyšším zpracovatelským výkonem.

Součástí technologického bloku, v němž probíhá postupné ochlazování spalin, může být odpařovací kolona, v níž se do proudu teplých spalin uskutečňuje vstřík odpadní zasolené vody z mokrého chemického čištění. Tímto je možné dosáhnout provoz spalovny bez vypouštění odpadních zasolených vod [B5]. Problematika využití tepla spalin byla analyzována např. v pracích [29–33, B2, B3, B25, B26].

Spaliny ochlazené na teplotu cca 180 až 350 °C v závislosti na technologickém řešení celé spalovny jsou následně zavedeny do bloku čištění spalin. K čištění spalin vzniklých při termickém zneškodňování odpadů je v praxi používána řada fyzikálních a chemických postupů, jejichž kom-

binací se dosahuje požadované úrovně odstranění nežádoucích složek [B27]. Technologická linka pro čištění vznikajících spalin zahrnuje operace:

- mechanického čištění (odloučení jemného popílku),
- chemického čištění (obvykle dvoustupňové odstranění kyselých produktů rozkladu a spalování odpadů /SO₂, HCl, HF/ a sloučenin těžkých kovů ze spalin),
- adsorpčního dočištění plynů od zbytkových výšemolekulárních organických sloučenin,
- snížení obsahu oxidů dusíku (nekatalytická event. katalytická redukce NO_x spojená s rozkladem dioxinů).

Konfigurace bloku čištění spalin může být přizpůsobena použité technologii čištění a konkrétním podmínkám vyplývajícím ze zpracování určitých druhů odpadů. Habilitační práce se zabývá především otázkami navrhování stupně pro absorpční čištění plynů.

2.3.1 Směšovací aparát nové konstrukce

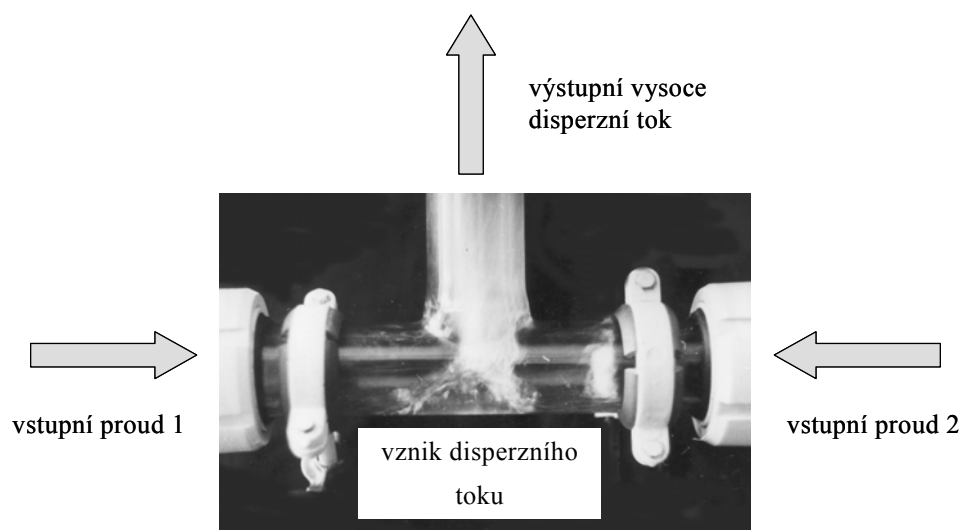
Uskutečnění chemického stupně čištění spalin od přítomných kyselých složek a těžkých kovů může být dosaženo buď cestou dvoustupňové absorpce v roztocích různé alkality nebo adsorpčním způsobem kontaktem s injektovaným práškovým sorbentem. Při absorpčním čištění je používán hydroxid vápenatý (ve formě vápenného mléka) nebo hydroxid sodný. Zařízení prvního stupně absorpčního čištění, v nichž je dosahováno ochlazení surového plynu a záchyt převážného podílu halogenovodíků i těžkých kovů a části SO₂ kontaktem s absorpční kapalinou, jsou obvykle v provedení sprchových aparátů nebo typu VENTURI (Venturi pračka, scrubber).

Je známo, že látkový tok absorbované složky je závislý na velikosti mezifázové plochy, součiniteli přestupu hmoty a na koncentračním gradientu složky v plynu a na mezifázovém rozhraní. Pro zvýšení účinnosti absorpčních procesů k záchytu znečišťujících složek ze spalin cestou zvětšení mezifázové plochy bylo ověřeno použití homogenizačního elementu vyvinutého během předchozí výzkumné činnosti autora [B28]. Homogenizační prvek, jehož princip je znázorněn na obr. 9, využívá efekt tzv. prstencového skoku, který byl v literatuře popsán již dříve [34]. Jedná se o jev, kdy režim dvoufázového proudění „plyn-kapalina“ přechází z formy prstencového toku do disperzního. Toto se děje vhnáním kapaliny z prstence proudícího při stěnách potrubí do centrálního jádra plynné fáze a vznikem turbulentních vírů mísících všechny přítomné tekuté složky v homogenní směs za současné disipace kinetické energie a zvýšení tlaku. Podmínkou vzniku prstencového skoku je vytvoření místní tlakové ztráty rovnající se dynamické složce tlaku proudící tekutiny.

Použité řešení, které je schematicky znázorněno na obrázku 9, využívá k dosažení tlakové ztráty v požadované výši čelní sražení dvou (nebo více) dvoufázových proudů, aniž by bylo nutné do proudů vkládat jakékoliv přepážky. Příznivý účinek tohoto řešení k homogenizaci dvoufázového proudění byl autorem ověřen dříve v rafinérském průmyslu [B29]. Na základě předchozí analýzy problému bylo navrženo nové a původní zařízení pro absorpční čištění spalin. Ověření funkce popsaného mísícího elementu pro čištění plynů bylo provedeno v laboratorním měřítku na zařízení znázorněném na obrázku 10 [B30, B31]. Jako sledovaná absorbovaná složka byl použit oxid siřičitý obsažený v čištěném plynu v koncentracích cca 200 až 1000 mg/m³. Dospělo se k následujícím hlavním výsledkům:

- Při použití popsaného homogenizačního elementu (tzv. O-kus) byla se srovnání s výsledky zjištěnými na modelovém aparátu klasického typu VENTURI dosahována za jinak stejných podmínek vyšší účinnost absorpce SO₂, a to zhruba o 20 až 30 % [B32].
- Experimentálně bylo zjištěno, že použití popsaného homogenizačního elementu způsobuje tlakovou ztrátou nižší (zhruba o 10 až 20 %) ve srovnání s hydraulickým odporem vznikajícím za stejných podmínek v pračce typu VENTURI [B33].

Popisované zařízení je i nadále předmětem výzkumných prací a zjištěné příznivé vlastnosti poskytují předpoklad pro ověření funkce aparátu v poloprovozním měřítku.



Obr. 9: Vznik disperzního toku při dvoufázovém proudění plyn-kapalina [B28].



Obr. 10: Mísicí element experimentálního zařízení [B30].

2.3.2 Zásady pro navrhování zařízení pro čištění spalin

V habilitační práci byly otázky navrhování zařízení pro čištění spalin diskutovány podrobněji. Hlavní poznatky důležité pro úspěšný návrh těchto zařízení lze shrnout následovně:

- Důležitým parametrem je teplota vystupující plyno-kapalinové směsi, která se ustaluje po nástřiku absorpční kapaliny do proudu čistěného plynu. Důvodem je nutnost respektování teplotního omezení při dimenzování aparátů mokré vypírky, pokud jsou tyto zhotoveny z plastů. Předmětnou teplotu je možné jen obtížně regulovat, neboť se nastavuje především v závislosti

na teplotě a složení vstupního plynu. Pro stanovení této teploty byl vypracován matematický model [B7], který je možné aplikovat na jakýkoliv typ sprchového chladiče.

- Vedle nároků na účinnost odstranění nežádoucích složek ze spalin je důležitým provozním parametrem bloku čištění spalin tlaková ztráta vznikající v jednotlivých aparátech. Provozní zkušenosti ukazují, že na trase dopravy spalin vzniká obvykle celková tlaková ztráta v rozmezí 5 až 10 kPa. Velikost tlakových ztrát při dopravě spalin má dopad na příkon spalinového ventilátoru, jenž je největším spotřebičem elektrické energie na spalovně. Vzhledem k tomu, že aparát bloku mokré vypírky se na celkové tlakové ztrátě podílí asi 50 až 60 % (z toho zařízení VENTURI vytváří tlakovou ztrátu cca 2 až 4 kPa), je nutné při návrhu těchto zařízení věnovat zvýšenou pozornost minimalizaci tlakových ztrát.
- Homogenizační prvek, který je popsán výše, vykazuje nižší hydraulický odpor než aparát typu VENTURI a jeho zařazením pro rychlé ochlazení spalin lze příznivě ovlivnit tlakovou ztrátu vznikající v prvním stupni mokrého čištění.
- Klasická technologie čištění spalin, spočívající v kombinaci mechanického odloučení tuhých látek a chemického čištění k odstranění kyselých složek a převážného podílu těžkých kovů, není obvykle postačující pro splnění emisních limitů pro zbytkový obsah dioxinů. Pro finální dočištění jsou využitelné známé technologie založené na adsorpci výšemolekulárních sloučenin na aktivním uhlí nebo uskutečňující katalytický rozklad dioxinů [35, B27, B34].
- V případě zpracování odpadů obsahujících těžké kovy nebo jejich sloučeniny je část těchto kovů unášena ve formě tuhých látek i par s proudem spalin vedených do aparátů utilizace tepla a čištění [36]. Na základě provozních měření byly stanoveny distribuční koeficienty pro těžké kovy sledované v emisích ze spaloven [B35]. Vyplývá, že zejména rtuť, kadmium, thalium, arsen a olovo přecházejí ve značné míře do úletů se spalinami, nicméně jejich převážný podíl je odlučován společně s popílkem. Pokud je ve spalovaném odpadu přítomna rtuť, nepostačují pro záchyt emisí Hg ani velmi účinné tkaninové filtry, neboť převážný podíl rtuti přechází ve formě par do bloku absorpčního a adsorpčního čištění.
- Pokud dočištění spalin od výšemolekulárních látek je prováděno adsorpčním způsobem průchodem spalin sypanou vrstvou sorbentu (např. aktivního uhlí), lze tlakovou ztrátu adsorberu výrazně snížit použitím aparátů s radiálním tokem plynu ložem sorbentu.
- Finální technologické operace sloužící ke katalytické redukci oxidů dusíku a rozkladu dioxinů jsou spojeny se zvýšením celkových tlakových ztrát na trase dopravy a čištění spalin. Pro minimalizaci tlakových ztrát je vhodné použít reaktory s radiálním tokem plynu.
- Při aplikaci technologie adsorpčního dočištění spalin pomocí uhlíkatých sorbentů musí být respektováno hledisko prevence vzniku požáru v důsledku možného vzniku horkých center v adsorpčním loži. Je účelné mít k dispozici přívod hasicí vody nebo inertního plynu přímo do lože sorbentu a kontinuálně sledovat změny v koncentraci CO ve výstupním plynu [B5].

2.4 EMISE OXIDŮ DUSÍKU A JEJICH SNÍŽOVÁNÍ

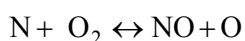
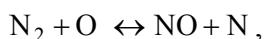
Mezi nežádoucí složky exhalací vznikajících při spalování paliv i odpadů patří oxidy dusíku (NO_x), v nichž převážný podíl je představován oxidem dusnatým. Je známo, že při spalování dochází k tvorbě oxidů dusíku v zásadě třemi reakčními mechanismy, podle nichž jsou vzniklé oxidy dusíku označovány jako termické, promptní a palivové [37, 38].

Snížení množství oxidů dusíku lze docílit v zásadě dvěma způsoby, z nichž primární opatření spočívají v omezení jejich tvorby již při spalovacím pochodu, sekundární opatření využívají redukčně-oxidační reakce mezi oxidem dusnatým a amoniakem, resp. látkami obsahujícími aminovou skupinu.

2.4.1 Matematický model tvorby oxidů dusíku založený na experimentálních datech

Otázky vzniku oxidů dusíku termickou cestou při spalování paliv za vyšších teplot byly posuzovány např. v pracích [42, 43, B36–B40]. Je známo, že tvorbu oxidů dusíku ovlivňují jak podmínky vlastního děje spalování (teplota spalin, složení paliva, přebytek vzduchu, množství ředící páry, recirkulace spalin atd.), tak konstrukční parametry hořáku a spalovacího zařízení (přívod paliva a vzduchu do plamene, geometrie spalovacího prostoru a teplosměnného systému atd.) [39]. Matematický popis tvorby oxidů dusíku je trvale předmětem prací řady autorů, z nichž je možné uvést např. [38, 40]. Nicméně široké spektrum parametrů ovlivňujících tvorbu oxidů dusíku v reálném zařízení nedovoluje zatím jejich produkci dostatečně přesně vystihnout ani složitými modely, což se týká zejména obtížně postižitelného faktoru stupňovitého přívodu paliva, resp. vzduchu do plamene. Na základě posouzení stavu a možností matematického modelování tvorby NO_x byly provedeny práce směřující k vytvoření zjednodušeného semiempirického matematického modelu pro predikci tvorby oxidů dusíku založeného na experimentálních datech. Model byl vytvořen za následujících předpokladů:

- Byl uvažován Zeldovičův mechanismus pro tvorbu termických oxidů dusíku [41] probíhající ve dvou krocích:



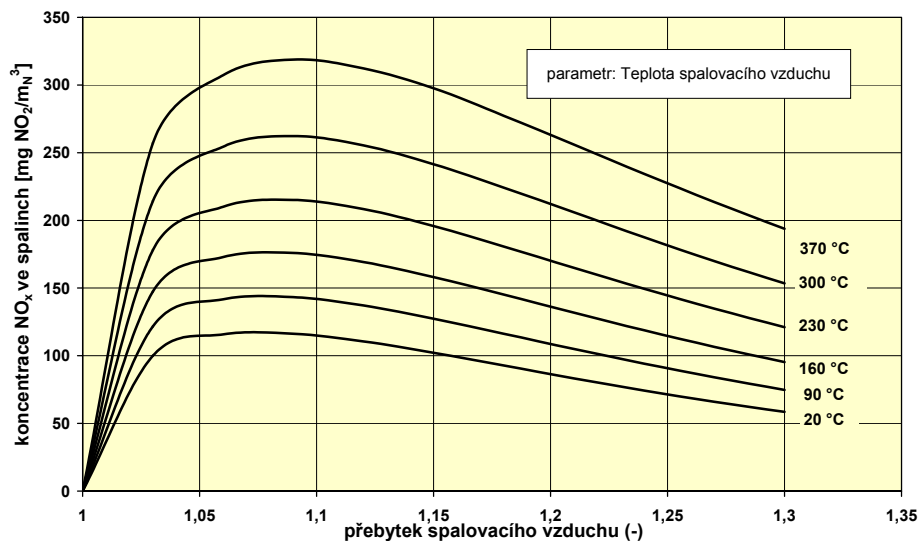
- Spalovací komora byla uvažována jako ideálně míchaný reaktor.
- Vyjádření koncentrace kyslíkových radikálů bylo provedeno s využitím principu předřazené rovnováhy rozkladu kyslíku.
- Reakční rychlost tvorby oxidů dusíku je vyhodnocena při určité hypotetické, tzv. ekvivalentní teplotě (T_{ekv}), která je závislá na:
 - = adiabatické teplotě spalování paliva (T_{TFT}),
 - = ochlazování spalovacího prostoru (η) vyjádřeném poměrem tepla odvedeného teplosměnným systémem a tepla do spalovací komory dodaného,
 - = konstrukčním provedení hořáku (s) vyjádřeným podílem paliva vstříkovaného do plamene primární tryskou k celkovému množství paliva.

Zpracováním souboru experimentálních dat získaných při zkouškách dvou konstrukčních variant plynového hořáku nominálního výkonu 1 MW [B40] byly vyhodnoceny potřebné koeficienty empirické závislosti

$$T_{\text{ekv}} = f(T_{\text{TFT}}, \eta, s).$$

Model byl použit pro simulaci vlivů podmínek při spalování plyných paliv na tvorbu oxidů dusíku [42, 43, B36–B40]. Je možné konstatovat, že výsledky získané použitím uvedeného modelu poměrně dobře odpovídají praktickým zkušenostem. Jako příklad je na obr. 11 uvedena závislost očekávané koncentrace NO_x ve spalinách ze zemního plynu na přebytku spalovacího vzduchu a na teplotě spalovacího vzduchu, která potvrzuje známou tendenci vzrůstu tvorby oxidů dusíku s teplotou plamene a existenci extrému v průběhu závislosti NO_x na přebytku vzduchu. Je zřejmé, že opatření vedoucí ke snížení energetické náročnosti spalovacích procesů, k nimž patří používání přehřátého spalovacího vzduchu a snižování přebytku spalovacího vzduchu, způsobují nárůst tvorby oxidů dusíku.

Semiempirický model je vhodný pro predikci tvorby oxidů dusíku vznikajících provozem daného typu hořáku v určitém spalovacím zařízení na základě předchozího zpracování experimentálních dat, čímž je možné ve fázi výzkumu a vývoje hořáků omezit rozsah poměrně náročných experimentálních prací.



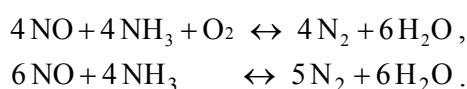
Obr. 11: Typická závislost koncentrace oxidů dusíku ve spalínách ze zemního plynu na přebytku a na teplotě spalovacího vzduchu [B38].

2.4.2 Podmínky vzniku oxidů dusíku při spalování odpadů a možnosti jejich odstraňování

Pokud posuzujeme podmínky tvorby oxidů dusíku při termickém zneškodňování odpadů, je nutné vycházet z omezení daných vlastní technologií spalování odpadů, zejména požadavky na dodržení stanovené teploty spalování a doby zdržení spalin. Obecně lze konstatovat:

- Předchozí rozbor (viz kapitola 2.1) vede k závěru o energetické výhodnosti spalování odpadů v prvním stupni v tavném režimu, čímž jsou do jisté míry podporovány podmínky pro tvorbu termických oxidů dusíku.
- Při aplikaci technologie zplyňování je v důsledku nižší pracovní teploty v prvním termickém stupni tvorba termických oxidů dusíku potlačena.
- Na celkovém množství vytvořených oxidů dusíku se v závislosti na složení zpracovávaného odpadu (za přítomnosti sloučenin s organicky vázaným dusíkem) může výrazně projevit tvorba tzv. palivových oxidů dusíku.
- Teplotní režim dohořivací komory při dvoustupňovém spalování nebezpečných odpadů ovlivňuje celkovou tvorbu oxidů dusíku. Hořáky dohořivací komory je vhodné volit v provedení se sníženou tvorbou oxidů dusíku.
- Praktické zkušenosti ukazují, že při spalování odpadů obvykle vznikají spaliny s obsahem oxidů dusíku odpovídajícím koncentraci cca 200 až 400 mg NO₂/mN³. Pro spalovny odpadů vyšších zpracovatelských výkonů, pro které stávající legislativa [4, 5] stanovuje maximální obsah NO_x odpovídající 200 mg NO₂/mN³, jsou potom aktuální sekundární opatření pro snížení obsahu oxidů dusíku.

K odstraňování oxidů dusíku jsou obvykle využity redukčně-oxidační reakce mezi oxidem dusnatým a amoniakem vyjádřené sumárně:



Reakce mohou probíhat buď nekatalyticky (za teplot přibližně 800 až 1 000 °C) [44] nebo katalyticky (za teplot cca 200 až 350 °C) [45]. Nekatalytické způsoby dosahují účinnost odstranění

oxidů dusíku cca 50 až 60 %, účinnost katalytických způsobů je na úrovni cca 70 až 90 %, nicméně vyšší efekt je spojen s nezanedbatelným zvýšením investičních i provozních nákladů. Důvodem je skutečnost, že tento aparátový blok musí být v technologické lince situován až po účinném očištění spalin od tuhých látek a oxidů síry [B1]. Pro snížení dopadu rozšíření technologické linky na tlakovou ztrátu na trase dopravy spalin je vhodné katalytický reaktor navrhnout v radiálním provedení.

S výhodou je katalytický způsob redukce oxidů dusíku spojován s rozkladem sloučenin spadajících do skupiny dioxinů [B1]. Při řešení problematiky odstraňování dioxinů je vhodné zvážit využití dalších již ověřených variant, mezi které patří postup katalytické filtrace spojující odstranění dioxinů s mechanickou filtrací spalin v látkovém filtru [35, B34] nebo adsorpce na uhlíkatých sorbentech [B1].

2.5 POUŽITÍ ODPADŮ JAKO ALTERNATIVNÍCH PALIV

Spalování odpadů je možné považovat za proces, který umožňuje dosažení recyklace části tepelné energie obsažené v odpadních látkách. Ve spalovnách odpadů se zpětné získávání energie uskutečňuje využitím entalpického potenciálu vzniklých spalin k výrobě přehřáté páry nebo ohřevu jiných technologických proudů.

V řadě případů se jako alternativa pro nakládání se vzniklými odpady jeví přímé použití ke krytí části nároků na dodávku tepla v různých technologických procesech. Pro využívání kalorického obsahu odpadů spoluspalováním s jinými palivy hovoří rovněž závěr uvedený v kapitole 2.1.2, kde je dokumentováno, že při dvoustupňovém termickém zneškodňování nebezpečných odpadů v obvykle používaném režimu oxidační spalovny (s teplotou v dohořovací komoře 1 100 °C) činí dodatečná měrná potřeba energie cca 30 až 100 % (i více) kalorické hodnoty obsažené v odpadu.

Z procesů, které přímo využívají tepelný potenciál odpadů, se jedná především o technologie silikátového průmyslu uskutečňované za dostatečně vysokých teplot umožňujících rozložení a spálení látek přítomných v odpadech. Jedná se o energeticky poměrně náročné výroby (s měrnou spotřebou tepla v rozmezí cca 3,7 až 6,0 MJ/kg) a dosažení i několikaprocentní náhrady kvalitního paliva odpadním kalorickým materiálem je spojeno s výraznými ekonomickými efekty. Hodnocením podmínek použití odpadů v technologii výroby cementu resp. páleného vápna se zabývají práce [B41–B44]. Při výrobě slínku lze dosáhnout krytí 10 až 20 % celkové dodávky tepla cementářské pece spoluspalováním kalorických odpadů, přičemž je nutno přihlížet k vlastnostem použitých odpadů a jejich vlivu na jakost produktu. Poněkud komplikovanější situace je při využití alternativních paliv při výrobě páleného vápna, což je produkt, pro který platí přísnější kvalitativní kritéria. Přímé spoluspalování spalování alternativních paliv dosud pro výrobu páleného vápna používáno není. Autor se podílel na přípravě a realizaci provozního pokusu pro přímé spalování tuhých alternativních paliv na jednotce pro výrobu páleného vápna [B42–B44] s využitím původního řešení [46]. Použité řešení umožnilo dosáhnout úsporu 16,7 % topného oleje bez zhoršení kvality produkovaného páleného vápna. Na příznivé výsledky navazuje v současné době příprava provozní realizace.

Při hodnocení možností zpracování kalů z čistíren odpadních vod se dospělo k závěru o využitelnosti kalů jako alternativního paliva pro výrobu cementářského slínku. Kvalitativní ukazatele slínku nejsou zbytky ze spalování kalů negativně ovlivněny, jelikož mineralogické složení popela vzniklého po spálení je blízké složení slínku. Důležitou podmínkou je snížení podílu vody zatěžující dopravu a snižující výhřevnost kalu. Pro vysušení kalu upraveného odstředěním (30 až 35 % sušiny) a dosažení zbytkové vlhkosti do 10 % hm. v kalu použitém ke spalování lze využít sušárnu využívající teplo, které je k dispozici v spalinách odváděných na finální čištění [B45].

3 ZÁVĚR

Habilitační práce je výsledkem dlouholeté výzkumné a realizační činnosti autora, získaných zkušeností a know-how a je zpracována na základě řady vlastních publikací, výzkumných projektů a realizací. Z hlediska obsahového je práce zaměřena na zhodnocení současného stavu v oblasti termického zpracování odpadů a formulování zásad pro navrhování strojního zařízení a provozování technologických celků zneškodňujících odpady, zejména s ohledem na energetickou náročnost různých variant technologického řešení dvoustupňového spalování nebezpečných odpadů. Jsou diskutována opatření, jimiž lze energetickou náročnost předmětné technologie snížit resp. dosáhnout její inovaci.

Pro technologii dvoustupňového termického zneškodňování odpadů se skýtají v zásadě dvě technologické varianty lišící se podmínkami spalování v prvním stupni, které může probíhat buď za přebytku kyslíku (v oxidačním režimu), nebo za nedostatku kyslíku (ve zplyňovacím režimu).

- Energetická náročnost procesu termického zneškodňování odpadů uskutečňovaného oxidačními technologiemi je výrazným způsobem ovlivněna teplotním režimem spalování a vlastnostmi zneškodňovaného odpadu, zejména jeho výhřevností.
- V závislosti na výhřevnosti zneškodňovaného odpadu existuje v technologii oxidační spalovny určitá optimální teplota spalování v prvním stupni, při které jsou celkové energetické nároky minimální. Tato optimální teplota spalování v prvním stupni se zvyšuje s rostoucí výhřevností zneškodňovaného odpadu.
- Praktické zkušenosti z provozu spaloven odpadů ukazují, že teplotní režim rotační pece nelze volit libovolně. Komplikujícím faktorem je tvorba nálepů z nespálených zbytků zneškodňovaných látek na vnitřní stěně vyzdívky rotační pece a teplotní režim je nutné této okolnosti přizpůsobit. Z energetického hlediska je vhodné pracovat v tzv. tavném režimu.
- Z hlediska provozních podmínek i energetické spotřeby je nevýhodné zpracovávat odpady proměnlivých vlastností, zejména pokud se týče výhřevnosti a obsahu síry, chloru a fluoru. Z toho důvodu je účelná homogenizace odpadů určených pro spalování.
- Z hlediska nároků na dodatečnou dodávku tepla formou spalování přídatného plynného nebo kapalného paliva je proces využívající technologii zplyňování v prvním stupni spalování výrazně méně energeticky náročný než proces termického zneškodňování odpadů pracující v oxidačním režimu. Využitím technologie zplyňování je možné minimalizovat spotřebu přídatného paliva a měrnou tvorbu spalin snížit až na 30 až 50 % oproti klasickému řešení spalovny oxidačními technologiemi.
- Využití technologie zplyňování vyžaduje náročnější přípravu suroviny určené k zneškodňování tříděním, drcením a směšování.
- Pro minimalizaci nákladů na dopravu spalin je nutné upřednostňovat všechna opatření vedoucí ke snížení hydraulických odporů aparátů a tlakových ztrát na dopravní trase ze spalovacího prostoru až do komína. Pro snížení tlakových ztrát aparátů se sypaným ložem (adsorberů a reaktorů) se jeví jako vhodné využívat aparáty s radiálním tokem.
- Pro zvýšení účinnosti aparátů mokré vypírky je důležitý intenzivní kontakt čištěných spalin s absorpčním roztokem. Intenzivní kontakt plynu s absorpčním roztokem je možné dosáhnout použitím kvalitativně nového homogenizačního elementu popsané konstrukce využívající pro vznik disperzního toku plynu v kapalině tzv. přechodového jevu.
- K dosažení požadované kvality koncových plynných zplodin se trvale zvyšují nároky na blok čištění spalin. Doplnkové operace sloužící pro snížení obsahu oxidů dusíku, resp. rozklad dioxinů se stávají nezbytnou součástí moderních technologických linek spaloven odpadů.
- Využívání kalorických odpadů jako alternativních paliv pro krytí části dodávky tepla v energeticky náročných výrobcích je aktuální zejména ve výrobcích cementářského průmyslu.

Analýza dané problematiky umožňuje vytyčit cílové záměry budoucího výzkumu spočívající v optimalizaci zařízení pro termické zpracování odpadů včetně využití energie.

4 POUŽITÁ A SOUVISEJÍCÍ LITERATURA

- [1] Vejvoda J., Buryan P.: Současný stav spalování odpadů v České republice ve světle požadavků EU, 48. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2001, Srní, Šumava, 15.–18. říjen 2001
- [2] Mikoláš J.: Ke koncepčním dokumentům o spalování komunálních odpadů. In Sborník příspěvků z mezinárodní konference Dny spalování 2004, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2.–3. červen 2004, edit. P. Slezák, VUT v Brně, 2004, s.134–137, ISBN 80-214-2650-0
- [3] Stráský D.: Nová energetická legislativa ve vztahu k životnímu prostředí. In Sborník příspěvků z mezinárodní konference Dny spalování 2004, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2.–3. červen 2004, edit. P. Slezák, VUT v Brně, 2004, s.8–12, ISBN 80-214-2650-0
- [4] Nařízení vlády č. 354 ze dne 3. července 2002, kterým se stanoví emisní limity a další podmínky pro spalování odpadu, Sbírka zákonů č. 354/2002, částka 127, s. 7354–7482
- [5] Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council of 4 December 2000 on the incineration of waste, Official Journal of the European Communities, L332/91-L332/111, 28. 12. 2000
- [6] Council directive 94/67/EC of 16 December 1994 on the incineration of hazardous waste, Official Journal of the European Communities, No 1, 365/34, 31. 12. 1994
- [7] Vyhláška č. 117/1997 Sb. Ministerstva životního prostředí ze dne 12. května 1997, kterou se stanovují emisní limity a další podmínky provozování stacionárních zdrojů znečišťování a ochrany ovzduší, Sbírka zákonů, částka 41, s. 2313–2375
- [8] Vyhláška 97/2000 Sb. Ministerstva životního prostředí ze dne 10. dubna 2000, kterou se mění vyhláška Ministerstva životního prostředí č. 117/1997, kterou se stanovují emisní limity a další podmínky provozování stacionárních zdrojů znečišťování a ochrany ovzduší, Sbírka zákonů, částka 31, s. 1499–1502
- [9] Santoleri J. J., Reynolds J., Theodore L.: Introduction to hazardous waste incineration, Second edition, p. 324–339, John Wiley & Sons, New York, 2000, ISBN 0-471-01796-6
- [10] Tillman D. A., Rossi A. J., Vick K. M.: Rotary incineration systems for solid hazardous wastes, Chem.Eng. Progress, July, p. 19–30, 1990
- [11] Štulíř R., Oral J., Bébar L., Stehlik P., Trunda P.: Integrated unit for thermal processing of polluted gases – alternative arrangement. In Proceedings of 3rd International Symposium on Incineration and Flue Gas Treatment Technologies, Brussels, Belgium, 2–4 July, 2001
- [12] Stehlik P., Štulíř R., Bébar L., Oral J.: Alternative arrangement of unit for thermal processing of wastes from polluted air, Journal of Cleaner Production, 12, No 2, p.137–146, 2003
- [13] Slouka P.: Teoretický výpočet zplyňovacího procesu ve fluidním loži, Plyn, roč. 63, č.12, s. 338–340, 1983
- [14] Klass D. L.: Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals, Academic Press, San Diego, 1998, ISBN 0-12-410950-0
- [15] Quaak P., Knoef H., Stassen H.: Energy from biomass – a review of combustion and gasification technologies, The Word Bank Technical Paper No 422, Washington, 1999
- [16] Whiting K. J.: Solid waste gasification perspectives, in Proceedings Conference on Incineration and Thermal Treatment Technologies, p. 177–182 Orlando, Florida, USA, 10–14 May, 1999

- [17] Whiting K. J. :Waste to energy in the field of thermal processing of wastes, in 3rd International symposium on incineration and flue gas treatment technologies, Proceedings, Brussels, Belgium, 2–4 July 2001
- [18] Rensfelt E., Gobel B.: Strategies for development and implementation of biomass gasification. In Proceedings of expert meeting Pyrolysis and gasification and wastes, Proceedings of expert meeting, Strasbourg, 30 September–1 October 2002. Edit. by A. V. Bridgwater, Chapter 69, p. 681–688, CPL Press, ISBN 1-872691-77-3
- [19] Dittrich M., Najser J.: Zplyňovací zařízení RDF firmy ATEKO. In Sborník přednášek semináře Zplyňování biomasy a tuhých odpadů, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Energetický ústav, Brno, 4.–5. prosinec 2001
- [20] Bergman P. C. A., van Paasen V. B., Boerrigter: The novel OLGA technology for complete tar removal from biomass producer gas. In Proceedings of expert meeting Pyrolysis and gasification and wastes, Strasbourg, 30 September–1 October 2002. Edit. by A. V. Bridgwater, Chapter 38, p. 347–356, CPL Press, ISBN 1-872691-77-3
- [21] Ochrana L., Skála Z.: Zplyňování biomasy na stendu VUT. In Sborník přednášek semináře Energetické využití biomasy v ČR a SR, Brno, 21. března 2001
- [22] Ochrana L. Dvořák P., Nguyen Van Tuyen: Zplyňování biomasy a tuhých odpadů v atmosférické fluidní vrstvě, Energetika, roč. 52, č. 4, s. 102–105, 2002
- [23] Ochrana L., Nguyen Van Tuyen: Zplyňování biomasy v atmosférické fluidní vrstvě, Acta Mechanica Slovaca, č. 3, s. 327–332, 2001
- [24] Nguyen Van Tuyen: Studie zplyňování biomasy v atmosférické fluidní vrstvě. Doktorská disertační práce, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, Energetický ústav, 2002
- [25] Mauchien J. P., Oudenne P. D.: Pyrolysis of wastes in a multistage pyrolyser. In Proceedings of expert meeting Pyrolysis and gasification and wastes, Strasbourg, 30 September–1 October 2002. Edit. by A. V. Bridgwater, Chapter 38, p. 347–356, CPL Press, ISBN 1-872691-77-3
- [26] Seveno E., Degrange S.: An alternative to incineration: The Japanese experience of new thermal processes, in Pyrolysis and gasification and wastes, Proceedings of expert meeting, Strasbourg, 30 September–1 October 2002. Edit. by A. V. Bridgwater, Chapter 28, p. 263–270, CPL Press, ISBN 1-872691-77-3, 2003
- [27] Garcia-Ibañez P., Cabanillas A., Sánchez J. M.: The first gasification tests of leached orujillo on a circulating fluidised-bed gasifier, in Pyrolysis and gasification and wastes, Proceedings of expert meeting, Strasbourg, 30 September–1 October 2002. Edit. by A. V. Bridgwater, Chapter 49, p. 477–486, CPL Press, ISBN 1-872691-77-3, 2003
- [28] Granados J. M.: Biomass gasification in small-scale applications, Project Report, Norges teknisk naturvitenskapelige universitet, Institutt for termisk energi og vannkraft, Trondheim, Norway, June 2001
- [29] Martinák P. and Stehlík P.: Optimisation of passout steam turbine extractions in process design. On Proceedings of 13th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 1998, Prague, Czech Rep., 1998
- [30] Martinák, P. and Stehlík, P.: Environmental and economics aspects of using passout steam turbine as utility system, PRES'99, Proceedings of the 2nd Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, p. 445–450, Budapest, Hungary, 31 May–2 June, 1999
- [31] Stehlik P., Martinak P., Havlen L., Puchyr R., Hajny Z. and Oral J.: Improved process and equipment design in relation to waste to energy systems. In Proceedings of International

- Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 14–18 May, 2001
- [32] Oral J., Šikula J., Puchýř R., Hajný Z., Trunda P., Stehlik P. and Bébar L.: Environmental, energy and economic aspects and sustainability in thermal processing of wastes from pulp production. In Proceedings of Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrovnik, Croatia, 2–7 June, 2002
- [33] Martinak P., Stehlik P., Bébar L.: Possible approach for optimum selection of utility systems. In Proceedings of 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002, 5th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2002, Prague, Czech Republic, 25–29 August, 2002
- [34] Haindl K.: Prstencový skok a přechodové jevy proudění, SNTL, Praha, 1975
- [35] Pranghofer G., Fritsky K. J.: Destruction of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans on fabric filters: Recent experiences with catalytic filter system. In Proceedings of 3rd International symposium on incineration and flue gas treatment technologies, Brussels, Belgium, 2–4 July, 2001
- [36] Cernuschi S., Giugliano M., Grosso M., Aloigi E., Miglio R.: PCDD/F and trace metals mass balance in a MSW Incineration full scale plant. In Proceedings of International Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies, Portland, Oregon, USA, 8–12 May, 2000
- [37] Beér J. M.: Minimizing NO_x emissions from stationary combustion – reaction engineering methodology, Chem. Eng. Science, 49, p. 4067–4083, 1994
- [38] Turns S. R.: Understanding for NO_x formation in non-premixed flames, experiments and modeling, Progress in Energy and Combustion Science, 21, p. 361–385, 1995
- [39] Stehlik P.: Problematics of NO_x emissions in process industry, Petroleum and Coal, Vol. 39, p. 30–35, 1997
- [40] Azevedo J. L. T., Carvalho M. G., Coelho J. P., Coimbra C. F. M., Nogueira M.: Modeling of combustion and NO_x emissions in industrial equipment, Pure & Applied. Chemistry, 65, p. 345–354, 1993
- [41] Zeldovich Z. B., Sadovnikov, P. Y., Kamenetskii F. D. A.: Oxidation of nitrogen in combustion (trans. by M. Shelef), Academy of Sciences of USSR, Institute of Chemical Physics, Moscow, Leningrad, 1947
- [42] Kermes V.: Zpracování matematického modelu tvorby oxidů dusíku při spalování plynných paliv, výzkumná zpráva, VUT FSI ÚPEI, 2001
- [43] Kermes V., Hajek J., Nekvasil R., Stehlik P., Bébar L., Oral J.: Evaluation of different approaches for prediction of NO_x emissions concentration from gas flames. In Proceedings of 16th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2004, 6th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2004, Prague, Czech Republic, 23–26 August, 2004
- [44] Seitz A.: Zkušenosti s denitrifikační technologií NO_x-OUT. In Sborník konference Teplárenské dny 1996, edit. Dům techniky ČSVTS Pardubice, 25.–27. září 1996, Pardubice
- [45] Fino D., Russo N., Solaro S., Sarraco G., Comaro U., Bassetti A., Specchia V.: Low temperature SCR catalysts for the simultaneous destruction of NO_x and dioxins, In Proceedings of 4th European Congress of Chemical Engineering, Granada, Spain, 21–25 September, 2003
- [46] Oral J.: Zařízení pro dávkování alternativního paliva do pece pro výrobu páleného vápna, zpráva EVECŮ Brno, č. EVB-010/2001, Brno, 2001

Související publikace autora (výběr ze 119 publikací)

- [B1] Bébar L., Stehlík P.: Legislativní předpisy ke snižování emisí a jejich požadavky na aplikaci. In Sborník přednášek semináře „Dioxiny a furany 2003“, Skalský dvůr, Žďárské vrchy, 5.–6. červen 2003, edit. P. Martinů, TechSoft Praha, 2003
- [B2] Bébar L., Martinák P., Hájek J., Stehlik P., Hajný Z., Oral J.: Waste to energy in the field of thermal processing of wastes, Applied Thermal Engineering, 22, No 8, p. 897–906, 2002
- [B3] Bébar L., Martinak P., Trunda P., Stehlik P., Hajny Z., Oral J., Waste to energy in the field of thermal processing of wastes, in Proceedings of 4th Conference on Process Integration, Modelling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction PRES'01, Edit by J. Klemes, p. 453–458, Florence, Italy, 20–23 May, 2001
- [B4] Bébar L., Pechman B.: Spalovna průmyslových odpadů 10 kt/rok, souhrnná technická zpráva č. 701-Z-0013, VUCHZ, 1999
- [B5] Bébar L.: Poznatky z realizace a prvpozu spalovny odpadů EKO-TOP v Rzeszówě (Polsko). Zpráva č. 1171, VUCHZ a. s. Brno, červenec 2000
- [B6] Bébar L., Martinák P., Havlen L., Stehlík P., Oral J.: Thermal processing of wastes using gasification. In Proceedings of IT3 '02 Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 13–17 May, 2002
- [B7] Havlen L., Puchýř R., Šponar M., Bébar L., Oral J., Stehlik P.: Modelling of system for thermal processing of wastes including heat recovery, In Proceedings of 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002, 5th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2002, Prague, Czech Republic, 25–29 August 2002
- [B8] Šponar M., Bébar L., Puchýř R., Stehlík P.: Simple computational tool for calculation of units for thermal processing of wastes. In Proceedings of 16th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2004, 6th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2004, Prague, Czech Republic, 23–26 August, 2004
- [B9] Štulíř R., Bébar L., Stehlík P., Fabikovič V., Oral J., Trunda P.: Výzkum a vývoj specifického zařízení pro termické zneškodňování odpadů – V, Úpravy, experimentální práce, sběr dat, alternativní uspořádání, varianta s katalytickým ložem, výzkumná zpráva VZ-311-313/02, VUT v Brně, prosinec 2000
- [B10] Dvořák R., Bébar L., Štulíř R., Stehlík P., Oral J.: Compact equipment for catalytic destruction of pollutants in waste gases. In Proceedings of 16th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2004, 6th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2004, Prague, Czech Republic, 23–26 August, 2004
- [B11] Bébar L., Havlen L., Oral J., Stehlik P., Puchýř R.: Biomass and wastes gasification – a contribution to renewable energy technologies. In Proceedings of 4th Conference on Process Integration, Modelling and Optimization for Energy Saving and Pollution Reduction PRES '01, Edit by J. Klemes, p. 465–470, Florence, Italy, 20–23 May, 2001
- [B12] Bébar L., Stehlík S., Dvořák R., Oral J.: Gasification as environmental and economic way of processing wastes, Journal of Cleaner Production, accepted for publication, 2003
- [B13] Bébar L., Stehlík P., Havlen L., Oral J.: Analysis of using gasification and incineration for thermal processing of wastes, Applied Thermal Engineering, accepted for publication, 2004
- [B14] Bébar L., Havlen L., Oral J., Stehlík P., Puchýř R.: Gasification of biomass and wastes. In Proceedings of 28th International Conference of the Slovak Society of Chemical Engineering, Tatranské Matliare, Slovensko, 21–25 May, 2001

- [B15] Bébar L., Martinák P., Trunda P., Stehlík P., Hajný Z., Oral J.: Comparison of two alternatives in the field „Waste-to-energy“. In Proceedings of 28th International Conference of the Slovak Society of Chemical Engineering, Tatranské Matliare, Slovensko, 21–25 May, 2001
- [B16] Bébar L., Havlen L., Oral J., Stehlík P., Puchýř R.: Zplyňování biomasy a odpadů jako příspěvek k obnovitelným energiím. In 48. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2001, Srní, Šumava, 15.–18. říjen 2001
- [B17] Havlen L., Bébar L., Martinák P., Puchýř R., Stehlík P.: Results from a gasification experiment in fluidized bed reactor and its alternative for thermal processing of waste. In Proceedings of 29th International Conference of the Slovak Society of Chemical Engineering, Tatranské Matliare, Slovensko, 27–31 May, 2002
- [B18] Bébar L., Havlen L., Dvořák P., Ochrana L., Skála Z., Stehlík P. and Martinák P.: Thermal processing of wastes using gasification. In Proceedings of 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002, 5th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2002, Prague, Czech Republic, 25–29 August, 2002
- [B19] Bébar L., Puchýř R., Richter J., Stehlík P., Kohoutek J., Luřcha J., Štulíř R., Havlen L., Fabikovič V.: Řešení problematiky zplyňování biomasy jako alternativního zdroje energie, výzkumná zpráva VUT-EU-UPEI-2000/02, VUT v Brně, listopad 2000
- [B20] Bébar L., Puchýř R., Oral J., Stehlík P.: Řešení problematiky zplyňování biomasy jako alternativního zdroje energie, výzkumná zpráva VZ-311-313/09, VUT v Brně, prosinec 2000
- [B21] Bébar L., Granados J.M., Dvořák P., Ochrana L., Skála Z., Stehlík P.: Zplyňování biomasy a odpadů jako příspěvek k obnovitelným energiím – zkoušky na experimentálním zařízení, výzkumná zpráva VUT-EU-UPEI-2001/01, VUT v Brně, listopad 2001
- [B22] Bébar L., Puchýř R., Havlen L., Stehlík P.: Zplyňování biomasy a odpadů jako příspěvek k obnovitelným energiím – Matematické modely, výzkumná zpráva VZ-311-313/11, VUT v Brně, prosinec 2001
- [B23] Bébar L., Puchýř R., Stehlík P., Oral J., Trunda P., Hajný Z., Havlen L., Březina J., Raus L.: Termické zneškodňování odpadů – II: Simulační program, aparáty a jejich výpočty, aplikace, průmyslové případy, výzkumná zpráva VZ-311-313-362-363/01, VUT v Brně, prosinec 2000
- [B24] Bébar L., Šponar M., Puchýř R., Oral J., Havlen L., Stehlík P.: Termické zneškodňování odpadů – III – Matematické modelování a programový systém – souhrn, výzkumná zpráva VZ-311-313-362-363/01, VUT v Brně, prosinec 2001
- [B25] Bébar L., Martinák P., Puchýř R., Stehlík P., Hajný Z., Oral J.: Waste-to-energy – využívání energie při termickém zneškodňování odpadů, výzkumná zpráva VZ-311-313/06, VUT v Brně, prosinec 2000
- [B26] Bébar L., Martinák P., Havlen L., Stehlík P., Hájek J., Hrnčíř K., Oral J., Puchýř R., Hajný Z.: Waste to energy – využívání energie při termickém zneškodňování odpadů – II, výzkumná zpráva VZ-311-313/08, VUT v Brně, prosinec 2001
- [B27] Bébar L., Puchýř R.: Dioxiny a technologie pro jejich odstraňování. In Sborník přednášek semináře „Dioxiny a furany 2003“, Skalský dvůr, Žďárské vrchy, 5.–6. červen 2003, edit. P. Martinů, TechSoft Praha, 2003
- [B28] Bébar L., Lukáš P, Filka J.: Potrubní tvarovka pro homogenizaci vícefázové směsi protékající potrubím; Autorské osvědčení č. 181658, 1981

- [B29] Bébar L., Lukáš P.: Zkušenosti s homogenizací dvoufázového proudění plyn-kapalina v potrubí. In sborník semináře „Dvoufázové proudění v trubkových aparátech“, VÚCHZ Hradec Králové, listopad 1977
- [B30] Bébar L., Filip M., Buchta J., Stehlík P., Hájek J., Dvořák R.: Nové zařízení pro čištění spalin, 49. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2003, Srní, Šumava, 20.–23. říjen 2003
- [B31] Bébar L., Oral J., Martinák P., Buchta J., Filip M., Stehlík P.: Návrh experimentálního zařízení pro čištění a využívání spalin a syntézního plynu, výzkumná zpráva VZ-311-313/10, VUT v Brně, prosinec 2001
- [B32] Filip M., Buchta J., Bébar L., Stehlík P.: Improvements of wet scrubbing process in units for thermal processing of wastes. In Proceedings of 16th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2005, 6th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2004, Prague, Czech Republic, 23–26 August, 2004
- [B33] Bébar L., Buchta J., Filip M., Hajek J., Oral J., Stehlík P., Puchýř R.: Modelling and optimisation of industrial absorption processes, Annual progress report – VUT contribution, Project No. GRD-2001-402661, Dortmund, 28. June, 2004
- [B34] Oral J., Šikulová P., Bébar L., Stehlík P.: Nová a účinná technologie pro bezpečné a spolehlivé snižování emisí dioxinů a furanů ze spaloven odpadů a dalších provozů. In Sborník příspěvků z mezinárodní konference Dny spalování 2004, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2.–3. červen 2004, edit. P. Slezák, VUT v Brně, 2004, s.13–17, 175 s., ISBN 80-214-2650-0
- [B35] Buchta J., Filip M., Bébar L., Stehlík P.: Heavy metals as pollutants in incinerators – downwards analysis. In Proceedings of 16th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2004, 6th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2004, Prague, Czech Republic, 23–26 August, 2004
- [B36] Kermes V., Hajek J., Bébar L., Čaněk J., Oral J., Stehlík P.: Emission reduction through effective burner design. In Proceedings of 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002, 5th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2002, Prague, Czech Republic, 26–29 August, 2002
- [B37] Kermes V., Hájek J., Bébar L., Čaněk J., Oral J., Stehlík P.: Emission reduction through effective burner design. In Proceedings of 29th International Conference of the Slovak Society of Chemical Engineering, Tatranské Matliare, Slovensko, 27–31 May, 2002
- [B38] Bébar L., Kermes V., Stehlík P., Čaněk J., Oral J.: Low NO_x burners – prediction of emissions concentrations based on design, measurements and modeling, Waste management, 22, p. 443–451, 2002
- [B39] Bébar L., Čaněk J., Kermes V., Stehlík P., Oral J.: Low NO_x burners – recent development, equipment, experience, modelling. In Proceedings of International Conference on Incineration & Thermal Treatment Technologies, Philadelphia, Pennsylvania, USA, May 14–18, 2001
- [B40] Bébar L., Kermes V., Oral J., Stehlík P.: Predikce koncentrací oxidů dusíku při spalování plyných paliv, výzkumná zpráva VZ-311-313-362-363/13, VUT v Brně, prosinec 2001
- [B41] Bébar L., Oral J., Martinák P., Puchýř R., Kermes V., Stehlík P.: Využití rotačních cementářských pecí ke zpracování odpadů, výzkumná zpráva VZ-311-313/12, VUT v Brně, prosinec 2001

- [B42] Martinák P., Bébar L., Strýček M., Oral J., Šťasta P., Stehlík P.: Využití tříděného komunálního odpadu jako alternativního paliva při výrobě stavebních hmot, výzkumná zpráva VZ-EU-UPEI-2002/05 pro řešení výzkumného záměru VZ 30004, listopad 2002
- [B43] Puchýř R., Bébar L., a kol.: Provozní zkouška spalování tuhých alternativních paliv v rotační peci pro výpal vápna, zpráva EVECO, č. EVB-05/01.00, Brno, 2001
- [B44] Bébar L., Kermes V., Puchýř R., Šťasta P., Stehlík P., Oral J.: Waste as alternative fuel for cement and lime production industry, In Proceedings of 4th International Symposium on Waste Treatment Technologies, Sheffield, UK, 29 June–2 July, 2003
- [B45] Šťasta P., Boráň J., Bébar L., Stehlík P., Oral J.: Industrial utilization of alternative fuel – thermal processing of sewage sludge. In Proceedings of 16th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2004, 6th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2004, Prague, Czech Republic, 23–26 August, 2004

5 ABSTRACT

Thermal processing of waste consists of a range of operations which enable destruction and combustion of all organic compounds at high temperature. Energy contained in products of combustion (incineration in this case) is utilized in heat recovery and waste to energy systems and pollutants are removed in off-gas cleaning systems in agreement with environmental regulations.

This thesis is aimed especially at up to date solution of processes and equipment of units for thermal processing of various types of waste including waste to energy. A special attention is devoted to analysis of optimum operation and energy utilization.

Processes for the thermal treatment of industrial and hazardous wastes which are most frequently used are evaluated. It means those units operated under oxidizing regime in two stage systems consisting of e.g. rotary kiln and secondary (afterburner) combustion chamber. A close relation between energy demand and temperature required was found. An analysis consisting in a substitution of a conventional oxidizing regime in the first stage of incinerator by a gasification reactor with fluidized bed with the aim to decrease energy demand was performed. The latter process based on gasification was found to be advantageous from the point of view of auxiliary fuel consumption, decreased volume of flue gas and its transport, and last but not least smaller size of equipment.

A special attention was devoted to using wastes with high calorific value as alternative fuel. This approach enables to reduce expensive fuel consumption in energy demanding technological processes, and has been demonstrated in cases of cement and lime production.

Systems for heat recovery and off-gas cleaning are also analyzed in thesis from the point of view of both design and operation. Since the environmental regulations become more and more sweeping it is necessary to investigate efficient technologies for removing pollutants as solid particles, acid compounds, and hydrocarbons from off-gas using physical and chemical processes. Relations between off-gas cleaning systems efficiency and costs for investment and operation were analyzed. Qualitatively new and original equipment for increasing efficiency of absorption wet scrubber was invented and investigated. A homogenizing “O-element” utilizing so called transition phenomenon for generating highly dispersion flow forms a key part of this equipment.

Nitrogen oxides emissions represent a serious problem which has to be solved. Research was focused on primary methods, i.e. considering low-NO_x burners in combustion chambers. A method for prediction of NO_x emissions concentration was created.

Based on research results a procedure for up to date design of units for the thermal processing of wastes was formulated. This approach should contribute to optimum approach in this field.