

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Návrh rotační pece pro spalovnu radioaktivních odpadů

Proposal of Rotary Killn for Radioactive Incineration Plant

Student: Tomáš Habr

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc

Ostrava 2012

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Habr**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 3907R004 Provoz a řízení v energetice
Téma: **Návrh rotační pece pro spalovnu radioaktivních odpadů**
Proposal of Rotary Killn for Radioactive Incineration Plant

Zásady pro vypracování:

Proveďte rešerži problematiky konstrukčních řešení spaloven nízkoaktivních odpadů. Naznačte a popište metody čištění spalin s obsahem radionuklidů. Vypracujte koncepční návrh rotační pece s dohořivací komorou pro spalovnu radioaktivních odpadů. Jmenovitý výkon spalovny bude 100 - 150 kg/hod.

Seznam doporučené odborné literatury:


HEJZLAR, R. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.
MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.
HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

MÍSTOPŘÍSEŽNÉ PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce : Tomáš Habr

Adresa trvalého pobytu autora práce : Bruntál, Uhlířská 8, PSČ 79201

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

HABR, T. *Návrh rotační pece pro spalovnu radioaktivních odpadů : bakalářská práce.* VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2012, 46s. Vedoucí práce: Kolat, P.

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukčním řešením spaloven a koncepcí rotační pece, která je určena pro spalování nízko aktivních radioaktivních odpadů a jejíž součástí je dohořivací komora. Úvod informuje o rozdělení radioaktivních odpadů dle různých hledisek. Dále navazuje popis jeho zpracování, metody užívané k čištění spalin a dvě alternativní řešení spalovací pece. Po teoretické části následují spalovací výpočty pro odpad a přiváděný plyn, návrh rozměrů spalovací pece a spalovací komory včetně prostupu tepla stěnou a volba materiálu pro vyzdívky.

ANNOTATION OF THESIS

HABR, T. *Proposal of Rotary Killn for Radioactive Incineration Plant : Bachelor Thesis.* VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Energetics, 2012, 46 p. Thesis head : Kolat, P.

The thesis focuses on a construction of incinerator plants and rotary killn which is designed for incineration of low-activity radioactive waste, and whose part is a burn-out chamber. The introduction informs one about sorts of radioactive waste according to different points of view. It is followed by a description of processing of radioactive waste, methods used for cleaning combustion products and two alternative solutions of an incinerator plant. The theoretical part is followed by combustion calculations for waste and supplied gas, a plan of proportions of the incinerator plant and combustion chamber including heat transfer through the wall, and a choice of material for lining.

OBSAH BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

1	ÚVOD	11
2	RADIOAKTIVITA	12
3	DĚLENÍ RADIOAKTIVNÍHO ZÁŘENÍ	13
	3.1 Zářením alfa	13
	3.2 Zářením beta	13
	3.3 Zářením gama	14
	3.4 Neutronové záření	14
4	DĚLENÍ RAO DLE SKUPENSTVÍ A AKTIVITY	15
	4.1 Pevné radioaktivní odpady	15
	4.2 Kapalné radioaktivní odpady	15
	4.3 Plynné radioaktivní odpady	16
	4.4 Rozdělení RAO podle úrovně aktivity	16
	4.4.1 Nízko aktivní RAO	17
	4.4.2 Středně aktivní RAO	17
	4.4.3 Vysoce aktivní RAO	17
	4.5 Dělení odpadu podle poločasu přeměny	17
5	LIKVIDACE RAO	19
	5.1 Předúprava	19
	5.2 Třídění	19
	5.3 Zpracování a úprava	19
	5.4 Spalování	20
	5.4.1 Výhody a nevýhody spalování	21
6	ČIŠTĚNÍ SPALIN	22
	6.1 Odlučování prachových částic	22
	6.1.1 Mechanické odlučovače	22
	6.1.2 Elektrické odlučovače	23
	6.1.3 Filtry	24
	6.2 Odstraňování kyselých složek	25
	6.2.1 Čištění spalin mokrou metodou	25
	6.2.2 Čištění spalin polosuchou metodou	26
	6.2.3 Čištění spalin suchou metodou	26

7	SPALOVNA RAO S ROTAČNÍ PECÍ	27
	7.1 Rotační pec	29
	7.1.1 Spalování v rotační peci	30
8	SPALOVNA RAO S PYROLYTICKOU PECÍ	31
	8.1 Pyrolytická pec	33
9	SPALOVACÍ VÝPOČTY	34
	9.1 Celková výhřevnost odpadu	34
	9.2 Spotřeba spalovacího vzduchu pro odpad	34
	9.3 Skutečné množství vlhkých spalin z odpadu	35
	9.4 Skutečné množství spalovacího vzduchu pro přídavný plynu	36
	9.5 Skutečné množství spalin z plynu	37
	9.6 Celkový normální průtok spalin	37
	9.7 Teplo odvedené spalinami a skutečný tok vlhkých spalin za spalovací komorou	38
10	NÁVRH SPALOVACÍ PECE	39
	10.1 Výpočet teploty za spalovací komorou	39
	10.2 Rozměry spalovací komory	40
	10.3 Rozměry dohořivací komory	41
	10.4 Vyzdívka spalovací komory	42
	10.5 Vyzdívka dohořivací komory	43
11	ZÁVĚR	44
12	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	45
13	SEZNAM PŘÍLOH	48

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

HEPA	nejdokonalejší filtr pro filtrování vzduchu	
LCC	hutný žárobeton s nízkým obsahem cementu	
PE	polyethylen	
PET	pozitronová emisní tomografie	
RAO	radioaktivní odpad	
$K_{1,2,3,4}$	konstanta	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
P_c	celkový tepelný příkon z odpadu	$[kW]$
$P_{c,pl}$	celkový tepelný příkon z plynu	$[kW]$
P_{sp}	teplo odvedené spalinami	$[kW]$
Q	tepelný výkon	$[kW]$
Q_{iC}	celková výhřevnost odpadu	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
Q_{ip}	celková výhřevnost plynu	$[MJ \cdot m_N^{-3}]$
S_{dk}	průřez dohořivací komorou	$[m^2]$
S_{sk}	průřez spalovací komorou	$[m^2]$
T_{SK}	teplota spalin na výstupu ze spalovací komory	$[K]$
$V_{vz,t}^s$	teoretické množství suchého spal. vzduchu pro odpad	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{vz,t,pl}^s$	teoretické množství suchého spal. vzduchu pro plyn	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{vz,sk}^s$	skutečné množství suchého spal. vzduchu pro odpad	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{vz,sk}^v$	skutečné množství vlhkého spal. vzduchu pro odpad	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{sp,t}^s$	teoretické množství suchých spalin z odpadu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{sp,sk}^s$	skutečné množství suchých spalin z odpadu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
V_{H_2O}	obsah vody ve spalinách z odpadu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{sp,sk}^v$	skutečné množství vlhkých spalin z odpadu	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$
$V_{O_2,t,pl}^s$	množství spalovacího kyslíku	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{vz,sk,pl}^s$	skutečné množství suchého spal. vzduchu pro plyn	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{vz,sk,pl}^v$	skutečné množství vlhkého spal. vzduchu pro plyn	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$

$V_{sp,t,pl}^s$	teoretické množství suchých spalin z plynu	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{sp,sk,pl}^s$	skutečné množství suchých spalin z plynu	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{H_2O,pl}$	obsah vody ve spalinách z plynu	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
$V_{sp,sk,pl}^v$	skutečné množství vlhkých spalin z plynu	$[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
\dot{V}_p	provozní spotřeba plynu	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
$\dot{V}_{sp,c,n}$	celkový normální průtok spalin	$[m_N^3 \cdot s^{-1}]$
$\dot{V}_{SP,SK}$	skutečný tok vlhkých spalin spalovací komorou	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
V_{SK}	objem spalovací komory	$[m^3]$
$\dot{V}_{SP,DK}$	skutečný tok vlhkých spalin dohořivací komorou	$[m^3 \cdot s^{-1}]$
V_{DK}	objem dohořivací komory	$[m^3]$
c_{sp}	měrné teplo spalin	$[kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$
d_{sk}	vnitřní průměr spalovací komory	$[m]$
d_{dk}	vnitřní průměr dohořivací komory	$[m]$
$d_{1,2,3}$	vnější průměr příslušné vrstvy	$[m]$
i	entalpie	$[kJ \cdot kg^{-1}]$
l_{dk}	délka dohořivací komory	$[m]$
l_{sk}	délka spalovací komory	$[m]$
m_O	hmotnost jedné dávky odpadu	$[kg]$
\dot{m}_{pal}	množství spalovaného odpadu	$[kg \cdot s^{-1}]$
n	přebytek vzduchu pro odpad	$[-]$
n_{pl}	přebytek vzduchu pro plyn	$[-]$
p_C	celkový tlak	$[Pa]$
p''	parciální tlak vodní páry	$[MPa]$
q	hustota tepelného toku	$[W \cdot m^{-2}]$
q_z	Tepelné ztráty do okolí z povrchu pláště rotační pece	$[W \cdot m^{-1}]$
t_1	teplota na výstupu ze spalovací komory	$[^{\circ}C]$
t_2	teplota spalin na výstupu z chladicího zařízení	$[^{\circ}C]$

t_{dk}	spalovací teplota v dohořivací komoře	[°C]
t_{sk}	spalovací teplota ve spalovací komoře	[°C]
$t_{st1,2,3,4}$	teploty stěn	[°C]
$t_{sp,1}$	skutečná teplota spalin za spalovací komorou	[°C]
$w_{sp,dk}$	průměrná rychlost spalin v dohořivací komoře	[m · s ⁻¹]
$w_{sp,sk}$	průměrná rychlost spalin ve spalovací komoře	[m · s ⁻¹]
z	ztráty vedením, sáláním a odvodem tuhých zbytků	[-]
α_1	součinitel přestupu tepla stěnou	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
α_2	součinitel přestupu tepla vzduchem	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
α_K	součinitel přestupu tepla konvekcí	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
α_S	součinitel přestupu tepla sáláním	[W · m ⁻² · K ⁻¹]
χ_v	součinitel vlhkosti	[-]
φ	relativní vlhkost	[%]
τ	interval dávkování odpadu	[min]
τ_{dk}	doba spalin v dohořivací komoře	[s]
$\tau_{dk,s}$	kontrola doby zdržení spalin v dohořivací komoře	[s]
τ_{sk}	doba spalin ve spalovací komoře	[s]
$\tau_{sk,s}$	kontrola doby zdržení spalin ve spalovací komoře	[s]

1. ÚVOD

Veškeré lidské činnosti produkují různorodé odpady, se kterými se musí nakládat dle příslušné legislativy tak, aby bylo co nejméně narušováno životní prostředí, a zároveň aby mohly být z co největší části využity jako druhotné suroviny. V zemích Evropské unie ročně vzniknou 2 miliardy tun odpadů a díky rozvíjející se společnosti jeho množství stále roste. Jaderné energetice a dalším odvětvím, kde odpad obsahuje radionuklidy, je nutné věnovat v zájmu bezpečnosti zvýšenou pozornost. Dle poločasu rozpadu se sice jako jediný přeměňuje na neaktivní prvky, ale vycházející ionizující záření je pro člověka a jeho okolí z hlediska ochrany životního prostředí to nejnebezpečnější.

Likvidace radioaktivního odpadu je velice náročná a prochází složitým procesem. Vysoce aktivní odpad je ukládán do speciálních hlubinných úložišť, zatímco nízko aktivní je spalován v rotačních nebo pyrolytických pecích, čímž dochází ke značné hmotnostní i objemové redukci. Radioaktivní obsah je ve formě popela a popílku ukládán na úložiště radioaktivních odpadů.

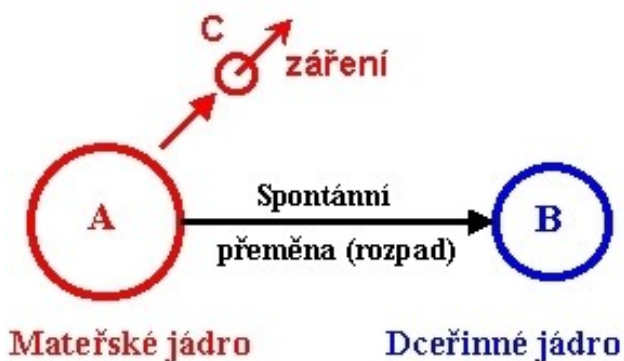
Spalovny jsou částí populace a ekologickými aktivisty vnímány jako nebezpečné. Veškerý proces spalování a následného čištění spalin je však neustále monitorován. Spaliny prochází vysoce účinnými filtračními kolonami, a proto je únik radioaktivních a jiných nebezpečných látek do okolí velice nepravděpodobný.

2. RADIOAKTIVITA

Již od samého počátku naší existence námi prolétají částice, ve kterých dochází k samovolné vnitřní přeměně atomových jader, přičemž je emitováno vysokoenergetické záření. Tento jev se nazývá radioaktivita a jádra vykazující tuhle vlastnost radionuklidy.

Radioaktivita byla objevena roku 1896 francouzským fyzikem Henrim Becquerelem při pokusech s luminiscencí minerálů a krystalů. Schéma radioaktivní přeměny je znázorněno na obrázku 2.1, kde se mateřské jádro A bez vnějšího zásahu přemění na menší dceřiné jádro B, přičemž vzniká částice C zvaná záření.

Největší část radioaktivity, která námi prochází, pochází z přírodních zdrojů, tj. půda, voda, rostliny, vzduch a horniny, kde největším zdrojem radiace je žula. Část přichází ve formě kosmického záření z vesmíru. V této přirozené radioaktivitě má největší zastoupení plyn radon. Naopak radioaktivita vyvolaná činností člověka, např. z jaderných elektráren, lékařství a zemědělství, se nazývá umělá a vzniká působením urychlených částic nebo vlivem řetězových reakcí. Nejsnadnější výroba radionuklidů probíhá při ozařování jader v reaktoru neutrony díky nulovému elektrickému náboji nebo ostřelování jádra protony v urychlovači. První umělý nuklid byl vytvořen roku 1934 ozařováním hliníku částicemi alfa.



Obr. 2.1 Schéma radioaktivní přeměny [15]

3. DĚLENÍ RADIOAKTIVNÍHO ZÁŘENÍ

Radioaktivní prvky sdílí jiný počet neutronů v jádře než většina atomů, které mají v jádře stabilní počet protonů a neutronů. Nestabilní jádra těchto prvků – radionuklidů – se rozdělují podle druhu emitovaného záření na záření alfa, beta, gama a neutronové záření. Liší se chováním v magnetickém a elektrickém poli a schopností pronikat látkou. Detekovat se dají pomocí fotografické desky nebo Geiger-Müllerovým počítačem, který má však nízkou účinnost a to 1-2%.

3.1 Záření alfa

Záření alfa je jaderná přeměna, kde přímo ionizující záření je tvořeno jádry helia, která obsahují 2 kladné náboje protonů a 2 kladné náboje neutronů. Má malou pronikavost a patří mezi nejpomalejší záření. Bývá pohlceno pouhým listem papíru nebo pokožkou ruky. Pokud ale pronikne do živé tkáně, například z potravy, díky silným ionizačním účinkům může způsobit vážné zdravotní problémy. Mezi radionuklidy alfa záření patří izotop uranu ^{238}U , thoria, radia, polonia a řada dalších prvků. Z hlediska použití je nejméně důležité právě díky malé pronikavosti.

3.2 Záření beta

Velmi rychle pohybující se částice při beta záření nesou buď kladný elektrický náboj pozitronů nebo záporný elektrický náboj elektronů. Jejich pohyb může být ovlivněn elektrickým polem. Pronikavost je větší než u záření alfa a mohou tedy proniknout materiály s malou tloušťkou nebo malou hustotou. K zastavení částic beta stačí vrstva vzduchu silná 1m, vrstva plexiskla o síle 1cm a nebo vrstva kovu, například olova o šířce 1mm. Nejčastěji se k odstranění používá tenká hliníková fólie. Záření beta je nejdůležitějším a nejpoužívanějším zářením. Využívá se v medicíně v systému PET (pozitronová emisní tomografie).

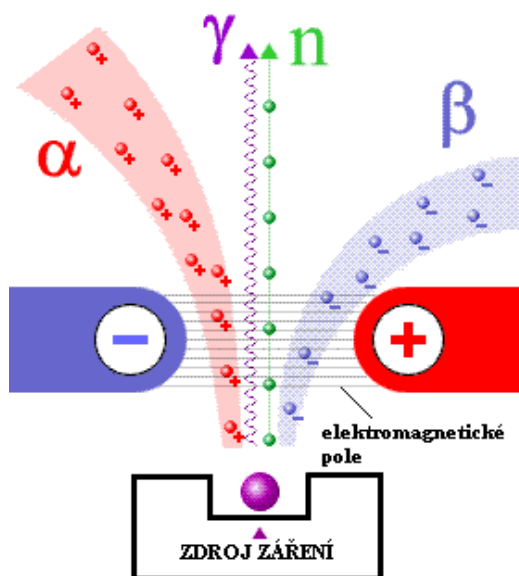
Při beta rozpadu neutronu na proton a elektron vzniká také tzv. neutrino, což je velmi lehká částice o klidové hmotnosti blízké nule, bez elektrického náboje, pohybující se rychlostí téměř srovnatelnou s rychlostí světla. Neutrino spolu s fotony patří mezi nejhojnější částice ve vesmíru.

3.3 Záření gama

Gama záření, pohybující se rychlostí světla, má charakter vlnění s podobnými vlastnostmi jako světlo nebo rentgenové záření. Často bývá vyzařované s alfa či beta zářením. Částice mají velmi vysokou pronikavost a jsou nejnebezpečnější, protože nemají žádný elektrický náboj. Díky tomu byla stanovena tzv. polotloušťka materiálů určující tloušťku materiálu, který má zachytit právě polovinu dopadajícího gama záření. Pro průchod částic gama má vzduch určenou polotloušťku 120m, olovo pak 13mm. Záření je pro člověka velice nebezpečné, způsobuje popáleniny, rakovinu a genové mutace. I přesto se používá například při léčení nádorů pomocí tzv. gama nože, v nukleárním lékařství pro diagnostické účely a nebo jako účinný prostředek na hubení bakterií, čehož je využíváno při sterilizaci lékařských nástrojů.

3.4 Neutronové záření

Jde o proud rychle letících a vysoce pronikavých neutronů, které nenesou žádný elektrický náboj. Lze jej vyvolat při jaderné explozi nebo v jaderných reaktorech. Stínění je velice složité a musí se sestavovat ze 3 vrstev obsahující vodík a jádra lehkých prvků. Používá se voda, parfín a beton.



Obr. 3.1 Druhy ionizujícího záření [16]

4. DĚLENÍ RAO DLE SKUPENSTVÍ A AKTIVITY

Radioaktivní odpady bývají rozdělovány a popisovány z několika hledisek, podle skupenství, úrovně aktivity, poločasu přeměny, technologie zpracování a dalších.

4.1 Pevné radioaktivní odpady

Největší část pevných RAO řadíme mezi nízko aktivní, popřípadě středně aktivní odpady. Patří zde vzduchotechnické filtry, drobný odpad ze sběrných míst, např. hadry a papír, a nebo odpad vzniklý při údržbě a opravách, tj. kovový, těsnící a izolační materiál. Řadíme zde také radioaktivní popel ze spalovacích pecí a vyhořelé jaderné palivo.

Díky velkému množství forem a materiálů je potřeba kombinovat různé procesy zpracování těchto odpadů, které následně vedou ke snížení jejich objemu. Nejčastěji využívaným procesem je nízkotlaké lisování, které zmenší objem až pětinasobně, nebo vysokotlaké lisování, kterým docílíme ještě podstatnějšího zmenšení objemu. Slisovaný odpad se umísťuje do 115 litrových sudů, které jsou po naplnění uzavřeny. Poté se nádoby vkládají do větších, 215 litrových, sudů a prostor mezi nimi je vyplněn neaktivní betonovou směsí.

Z hlediska dlouhodobé manipulace a konečného skladování je však vhodnější metoda spalování. 50 – 80% odpadů je spalitelných a kromě významného snížení objemu se získá konečný homogenní produkt ve formě popela. Spalováním se taktéž odstraňují organické kapaliny jako jsou oleje, mazadla nebo rozpouštědla.

4.2 Kapalně radioaktivní odpady

Mezi tyto odpady patří radioaktivně kontaminované kapaliny, které mohou být organické nebo vodné. Vznikají čištěním primárního chladiva, drenážních vod, oplachových vod nebo při opravách a údržbě. Hlavním úkolem je snížení obsahu radionuklidů, aby se převážná část mohla buď bezpečně vypustit zpět do přírody nebo se mohly důležité prvky znovu použít.

K největšímu snížení objemu a k nejúčinnější dekontaminaci dojdeme odpařováním přebytečné vody. Vzniklé soli obsahují většinu radionuklidů a čistý kondenzát je bez dalšího zpracování vypouštěn do povrchových vod. Další možností dekontaminace je chemická metoda, kdy se do kapalných odparů přidávají srážecí činidla, pomocí kterých se radionuklidy srážejí a usazují na dně jako nerozpustné soli. Tato metoda však není příliš účinná.

K čištění vody primárního a sekundárního okruhu reaktoru, kondenzátů z odparek a vody z bazénů pro skladování vyhořelého paliva se používá metoda výměny iontů. Tu zajišťují tzv. iontoměničové filtry. Zbylé odpady, které zůstanou po zpracování mokré, je nutno přeměnit na pevné, a to z důvodu snížení pohybu radionuklidů při dopravě a skladování. Pro zpevnění se používá cementace, bitumenace a polymerace.

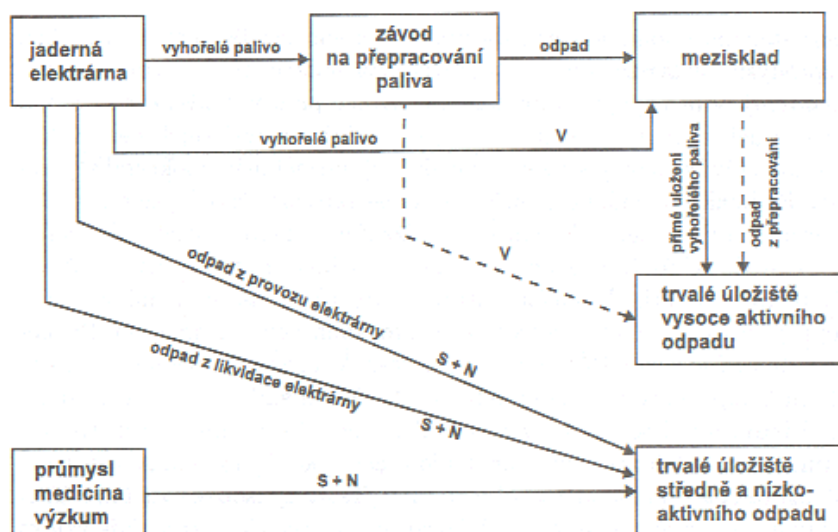
4.3 Plynné radioaktivní odpady

Největší část plynných odpadů vznikající v primárním okruhu je odváděna přes čisticí filtry do ventilačního komína. Menší část se uvolňuje z kapalných odpadů. Vše je odváděno do systému speciální vzduchotechniky, kde se plyny filtrují a zadržují v absorpčních kolonách, aby jejich aktivita poklesla na stanovenou mez. Ventilačními komíny jsou poté kontrolovaně vypouštěny do ovzduší. Veškerý proces je neustále monitorován a průběžně hodnocen. Nejdůležitějšími zástupci těkavých radionuklidů jsou halogeny, vzácné plyny, tritium a uhlík ^{14}C .

4.4 Rozdělení RAO podle úrovně aktivity

- Nízko aktivní RAO (Low Level Wastes)
- Středně aktivní RAO (Intermediate Level Wastes)
- Vysoce aktivní RAO (High Level Wastes)

Měrná aktivita nebo uvolňované teplo je základním kritériem, podle kterého je odpad rozdělen do těchto tří základních tříd. Vznik a pohyb odpadu je zobrazen na obrázku 4.1.



Obr. 4.1 Vznik a pohyb RAO [31]

4.4.1 Nízko aktivní RAO

Sem patří přibližně 90% veškeré produkce radioaktivních odpadů, které převážně tvoří zbytky z radioaktivních provozů v jaderných elektrárnách, průmyslu, výzkumu a nemocnic. Jsou to kovy, dřevo, papírové a plastické obaly, nářadí, vyřazené stroje, tkaniny a ochranné pracovní oděvy, odpadní plyny z ventilací atd. Ukládají se do povrchových úložišť, protože obsahují malé množství radionuklidů. Část odpadů, která je spalitelná, se před uložením zpopelní.

4.4.2 Středně aktivní RAO

Vzniká při těžbě uranových rud nebo v jaderných elektrárnách. U tohoto typu RAO je nutné stínění, avšak uvolňované teplo je malé. Patří sem převážně servisní materiály, což jsou obaly jaderného paliva, konstrukční materiály palivových souborů, kaly, pryskyřice, hlušina, aerosolové filtry, náplně kolon chemické úpravy moderátorů, chladičů a zařízení na úpravu vyhořelého paliva. Středně aktivní RAO se ukládá v hlubinném geologickém nebo povrchovém úložišti.

4.4.3 Vysoce aktivní RAO

Tento odpad vyžaduje díky velkému uvolňování tepla chlazení a stínění. Přes 90% tvoří vyhořelé palivové články z jaderných elektráren obsahující štěpné produkty a odpady z výroby a procesu obohacování jaderného paliva. V kapalném skupenství se tyto látky ukládají do skleněné matrice při tzv. vitifikaci. Díky extrémně dlouhému poločasu rozpadu se vysoce aktivní RAO ukládá pouze do hlubinného geologického úložiště s dlouhou životností.

4.5 Dělení odpadu podle poločasu přeměny

Radioaktivní odpad se dělí podle aktivity a poločasu rozpadu do pěti hlavních kategorií. U každé kategorie je vyžadován rozdílný postup při zneškodňování a ukládání odpadů.

Kategorie I

Vysoce aktivní RAO, které obsahuje dlouhodobé zářiče a produkuje intenzivní teplo. Ukládá se do speciálně vybudovaných hlubinných úložišť. Radiotoxicita může trvat až milióny let.

Kategorie II

Středně aktivní RAO, též obsahují dlouhodobé zářiče, ale produkují méně tepla. Uložení je stejné jako u vysoce aktivního RAO. Radiotoxicita je střední a může trvat statisíce let.

Kategorie III

Nízko aktivní RAO obsahují dlouhodobé zářiče s velmi malou produkcí tepla. Ukládají se též v hlubinném úložišti. Radioaktivní nebezpečí může trvat desetitisíce let.

Kategorie IV

Středně aktivní RAO s krátkodobými zářiči a mírnou produkcí tepla. Uložení se doporučuje v jeskyních, solných dolech, nebo v povrchových a podpovrchových úložištích se zesílenou strukturou. Nebezpečnost se měří na tisíce let.

Kategorie V

Nízko aktivní RAO s krátkodobými zářiči produkuje minimum teplené energie. Uložení je stejné jako v kategorii IV. Doba nebezpečí je stovky let.

5. LIKVIDACE RAO

Než se radioaktivní odpad ukládá do úložišť, prochází řadou činností, které zmenšují objem a ulehčují jeho další zpracování.

5.1 Předúprava

Při shromažďování RAO na pracovišti, kde vzniklo, je důležité dodržovat požadavky na třídění, místo shromažďování a dočasného skladování, maximální povolené množství skladovaného materiálu atd. Tento odpad již nesmí obsahovat neradioaktivní a jiné nebezpečné prvky. Pevné RAO se skladuje v polyethylenových pytlích, nebo v kovových sudech, kapalně RAO v těsných PE lahvích. Celý proces se musí evidovat.

5.2 Třídění

Pevný RAO se třídí do tří kategorií a to na přechodný, nízko aktivní a středně aktivní a vysoko aktivní. Přechodný RAO po maximálně 5letém skladování vykazuje radioaktivitu nižší než jsou uvolňovací úrovně a dále se s ním nakládá jako s neaktivním odpadem. U vysoko aktivního odpadu se musí zohledňovat uvolňování tepla z rozpadu radionuklidů. Ostatní odpady jsou nízko a středně aktivní. Dle složení radionuklidů je odpad tříděn na umělou nebo přírodní kontaminaci.

V Centru se odpad třídí na pevný (lisovatelný, nelisovatelný), kapalný (vodný, nevodný a obsahující tritium) a speciální radioaktivní odpad (např. jaderné materiály). Nelisovatelný RAO je tvořen převážně kovovým odpadem a lisovatelný především papírem, buničinou, plastem atd. Do kapalného odpadu patří vodné roztoky a organická rozpouštědla.
[19]

5.3 Zpracování a úprava

Odpady se zpracovávají a upravují ve fragmentačním a dekontaminačním středisku a v dalších zařízeních, kde je hlavním úkolem zmenšení jejich objemu. Ve fragmentárním a dekontaminačním středisku je odpad dělen řezáním, stříháním, rozbrušováním nebo plamenem či plazmou a dochází zde k mechanické nebo chemické dekontaminaci.

K lisování RAO se používá pro lehkostlačitelné odpady (např. filtrační papír, pěnový polystyrén, tkaniny, kartony, vata, atd.) nízkotlaké lisování (tlak 0,3-5MPa) a pro těžkostlačitelné odpady (např. laboratorní sklo, plasty, tenké plechy atd.) vysokotlaké lisování (tlak 5-35MPa).

5.4 Spalování

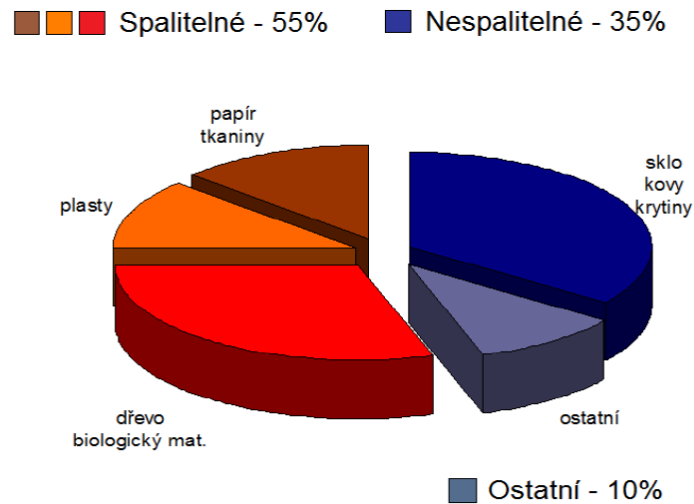
Při spalování dochází ke značné hmotnostní i objemové redukci pevných a některých kapalných RAO. Dochází též k podstatné eliminaci kontaminantů, čímž se zjednodušuje konečné uložení nespálených zbytků. Pouhé 3% radioaktivity prochází filtrovacím systémem čištění aktivních složek, zbylých 97% přechází do popela. 50 až 80% pevného odpadu je spalitelného, přičemž pro některé odpady platí, že spalování je jediným způsobem jejich odstranění. Při spalování je také možné využít uvolněného tepla nebo jeho přeměny na jinou formu energie.

Před spalovacím procesem musí dojít k vysušení odpadu při teplotách 50 až 150°C a následnému ohřevu na zápalnou teplotu pomocí konvekce s předehřátým vzduchem nebo horkými spalinami, popřípadě sáláním žhavých spalin a stěn pece. Po dosažení vyšších teplot vznikají těkavé látky, které zajišťují hoření. Zbývající materiál je postupně odplyňován a pomalu spalován.

Výsledný tuhý roztok se zpracovává cementací do sudů, které jsou vkládané do kontejnerů a následně zalité cementační kaší. Poté se kontejnery skladují na úložišti RAO. Spalováním se odstraňují i oleje, maziva nebo rozpouštědla. [20]

K zajištění spalování s téměř neškodnými plynnými látkami se musí dodržovat tyto základní podmínky:

- Dostatek spalovacího vzduchu s přebytkem 1,5 až 2,5 kvůli různorodosti odpadů
- Dostatek tepla pro krytí ztrát do okolí a udržení minimální teploty ve spalovací komoře
- Zdržení spalin v dohořivací komoře při teplotách 1000 - 1300°C po dobu minimálně 2 sekund



Obr. 5.1 Poměr spalitelného a nespalitelného RAO [20]

5.4.1 Výhody a nevýhody spalování

Výhody spalování:

- Snížení objemu odpadů na 10 až 15% původního objemu
- Pro mnohé typy odpadů jediný způsob jejich odstranění
- Sterilní, tuhý zbytek po spalování – snížení zdravotního rizika
- Využití uvolněného tepla pro výrobu páry a teplé užitkové vody
- Spalování je nejrychlejší možností odstranění odpadů

Nevýhody spalování:

- Vysoké investiční náklady
- Vysoké náklady na provoz a údržbu
- Malé možnosti využití vyrobeného tepla
- Nutnost kvalifikovaného personálu

6. ČIŠTĚNÍ SPALIN

Kvůli škodlivým, plynným produktům, které vznikají při spalování odpadů musí být každá spalovna povinně vybavena systémem na čištění spalin. Mezi tyto škodlivé produkty patří prachové částice, anorganické chlórové (HCl) a fluoridní (HF) směsi, oxid siřičitý, dusnatý a uhelnatý, cadmium, thallium, rtuť, těžké kovy (Zn, Pb, Cd aj.) a jejich sloučeniny. Systémy na čištění spalin jsou velmi nákladné, avšak účinnost odstranění škodlivých látek je vysoká, např. odstranění prachových částic činí 99 až 99,5%.

Pro spalovny platí dvě základní technologické úlohy čištění spalin:

- Zachycení prachových částic
- Odstranění kyselých složek

6.1 Odlučování prachových částic

Prachové částice jsou hlavním zdrojem emisí a jejich obsah ve spalinách je dán několika faktory: [27]

- Množstvím spalovacího vzduchu přisávaného pod rošt
- Výškou lože odpadu
- Stupněm promíchávání odpadu
- Obsahem popela v odpadu
- Rychlostí proudění plynu

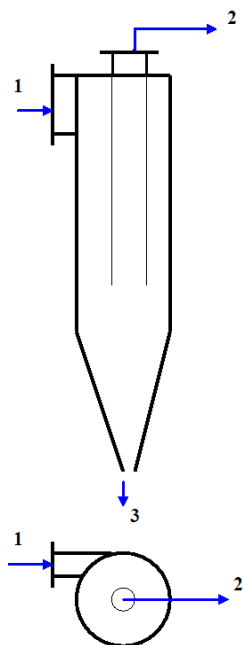
6.1.1 Mechanické odlučovače

Na základě odlišné hustoty tuhých částic a plynných spalin se pomocí gravitační nebo setrvačné síly tyto částice od sebe oddělují. Mezi nejjednodušší typy odlučovačů patří tzv. usazovací komora, která se již pro svou nízkou účinnost nevyužívá, a prašník, který je sice konstrukčně jednoduchý a má malou tlakovou ztrátu, ale je prostorově náročný a jeho účinnost je též nízká.

Mezi nejpoužívanější typy patří vírové odlučovače, neboli cyklóny. Ty jsou založeny na využití odstředivé síly při uvedení proudu plynu do rotačního pohybu. Pro velká průtočná

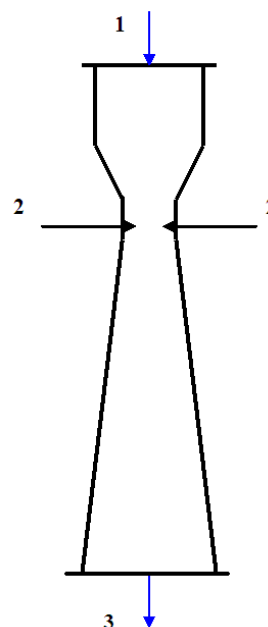
množství, kde vírové odlučovače nevystačí, se využívají skupinové cyklónové odlučovače nebo multicyklóny. Výhodou jsou nízké náklady, výrobní jednoduchost a provozní spolehlivost. Zásadní nevýhodou je obrušování zařízení prachovými částicemi.

Pro zvýšení účinnosti začaly vznikat mokré mechanické odlučovače. Nejpoužívanější jsou vírníkové a proudové (Venturiho pračky). Dosahuje účinnost až 99 %.



Obr. 6.1 Cyklón s tečným vstupem plynu [27]

- 1 – Vstup zaprášeného plynu
- 2 – Výstup odprášeného plynu
- 3 – Výstup odloučeného prachu

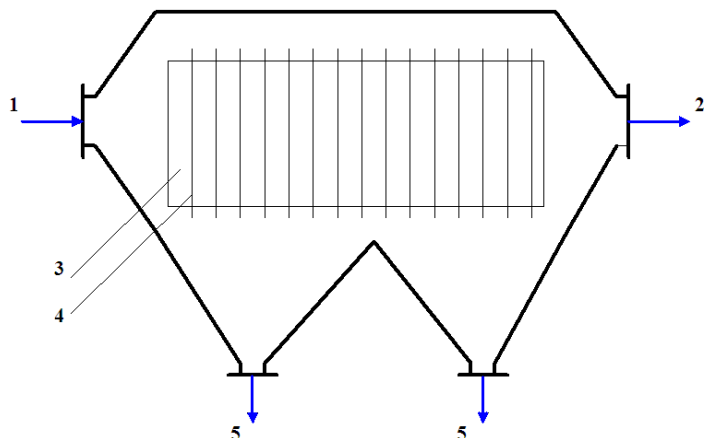


Obr. 6.2 Proudový odlučovač [27]

- 1 – Vstup znečištěného plynu
- 2 – Trysky pro nástřík vypírací kapaliny
- 3 – Výstup plynu s vypírací kapalinou

6.1.2 Elektrické odlučovače

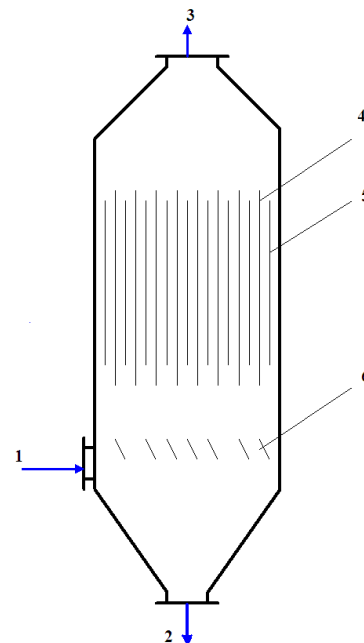
V elektrických odlučovačích, které jsou používány hlavně pro velké průtoky plynů, se zachycuje popel vyskytující se ve formě prachu s různou zrnitostí. Využívá se přitažlivých sil mezi elektricky nabitými částicemi prachu s elektrodou o malé ploše a opačně nabitou sběrací elektrodou o relativně velké ploše. Nejčastěji se tato metoda využívá před mokřým čištěním. Dosáhne se tak účinnosti až 99,9 % při malé tlakové ztrátě 20 – 100 Pa. Nevýhodou jsou velké pořizovací náklady a rozměry.



Obrázek 6.3 [27]

Horizontální komorový elektrický odlučovač

- 1 – Vstup plynu
- 2 – Výstup plynu
- 3 – Deskové usazovací elektrody
- 4 – Drátové nabíjecí elektrody (katody)
- 5 – Výsypy odloučeného prachu



Obrázek 6.4 [27]

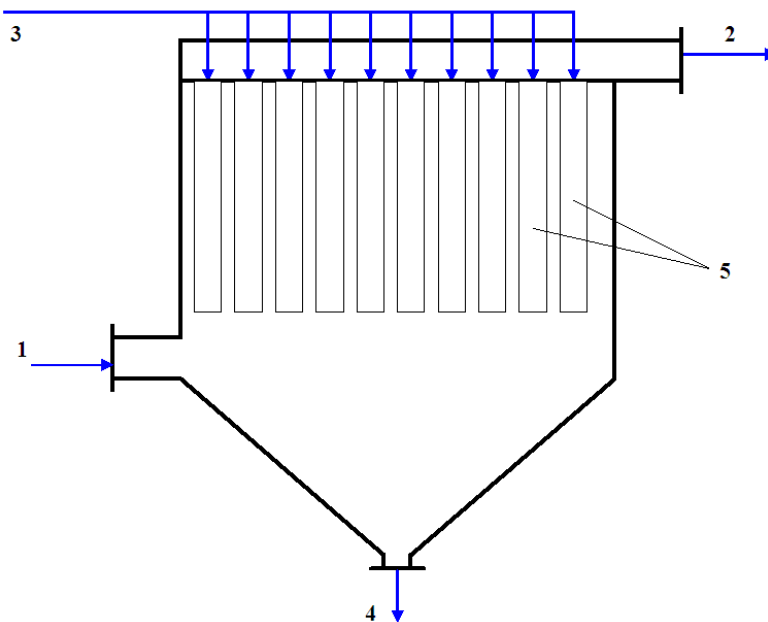
Vertikální trubkový elektrický odlučovač

- 1 – Vstup plynu
- 2 – Výstup odloučeného prachu
- 3 – Výstup plynu
- 4 – Drátová nabíjecí elektroda (katoda)
- 5 – Trubková usazovací elektroda (anoda)
- 6 – Rozváděcí žaluzie

6.1.3 Filtry

Slouží především k odstraňování polétavého popílku u menších spalovacích zařízeních. Popílek je odlučován přes tkaninu s dostatečnou tepelnou a mechanickou odolností. Tyto filtry se dělí podle tvaru filtrační látky na hadicové, kde se používají hadice různé délky a průměru, a na kapsové, které jsou nejčastěji v obdélníkovém tvaru. Důležitým procesem je pravidelné odstraňování prachu z tkaniny a to mechanickým oklepáváním, vibracemi nebo zpětným profukováním čistým plynem. Výhodou jsou nízké pořizovací náklady, vysoká provozní spolehlivost a účinnost. U nejmodernějších filtrů dosahuje účinnost až 99,99%.

Jelikož vzduch, který projde filtrací, bývá čistší než běžný venkovní vzduch, může být z většiny vrácen zpět do spaloven, nehrozí-li jiné nebezpečí. Díky tomu lze ušetřit na vytápění bez potřeby rekuperačních výměníků.



Obrázek 6.5 Textilní filtr [27]

1 – Vstup plynu, 2 – Výstup plynu, 3 – Přívod tlakového vzduchu pro zpětný proplach,
4 – Výsyp odloučeného prachu, 5 – Koše s filtrační textilií

6.2 Odstraňování kyselých složek

V závislosti na fyzikálním stavu sorpčního činidla se dá odstraňování kyselých složek rozdělit do 3 skupin:

- Čištění spalin mokrou metodou
- Čištění spalin polosuchou metodou
- Čištění spalin suchou metodou

6.2.1 Čištění spalin mokrou metodou

Spaliny se propírají ve sprchových pračkách zásaditou kapalinou, kterou bývá roztok vápenného mléka nebo hydroxidu sodného. Je dosahováno vysoké účinnosti čištění spalin od kyselých složek, prachových částic a jiných plynných kontaminovaných látek. Pro čištění hrubých částic je však nevhodná. Zanáší se trysky a sorbent, a proto se musí před vstupem do

pračky hrubé částice odstraňovat např. elektroodlučovačem. Nevýhodou mokré metody je vznik radioaktivní vody, která se musí vhodně zpracovat a skladovat na úložišti.

6.2 Čištění spalin polosuchou metodou

U této metody vytváří rotační rozprašovač mlhu, kterou spaliny prochází, a SO_x se váže na mokré vápenec. Dochází k vypařování částic vody, a tím k úplnému vysušení pracího média. Granule suchého zreagovaného vápence jsou unášeny z absorberu a zachycují se do elektroodlučovače nebo tkaninového filtru. Nezreagované částice padají ke dnu absorberu do jímky. Prací médium se suší v souprroudých i protiproudých pracích sušárnách. Účinnost polosuché metody je 80-90%.

6.3 Čištění spalin suchou metodou

Zde se sorbent (vápenec nebo uhličitan sodný) dávkuje přímo do proudu spalin. Následuje čištění na rukávcových filtrech, kde se směs usazuje a tvoří filtrační koláč. Je nutné usazeniny ponechat určitý čas na místě a neoklepávat, aby reakce ve filtračním koláči doběhla. Pro pohlcení těžkých kovů, dioxinů a furanů je vhodné vstříkovat do proudu spalin i malé množství hnědouhelného koksu nebo aktivního uhlí. Často bývá před celou technologií zařazen elektrofiltr.

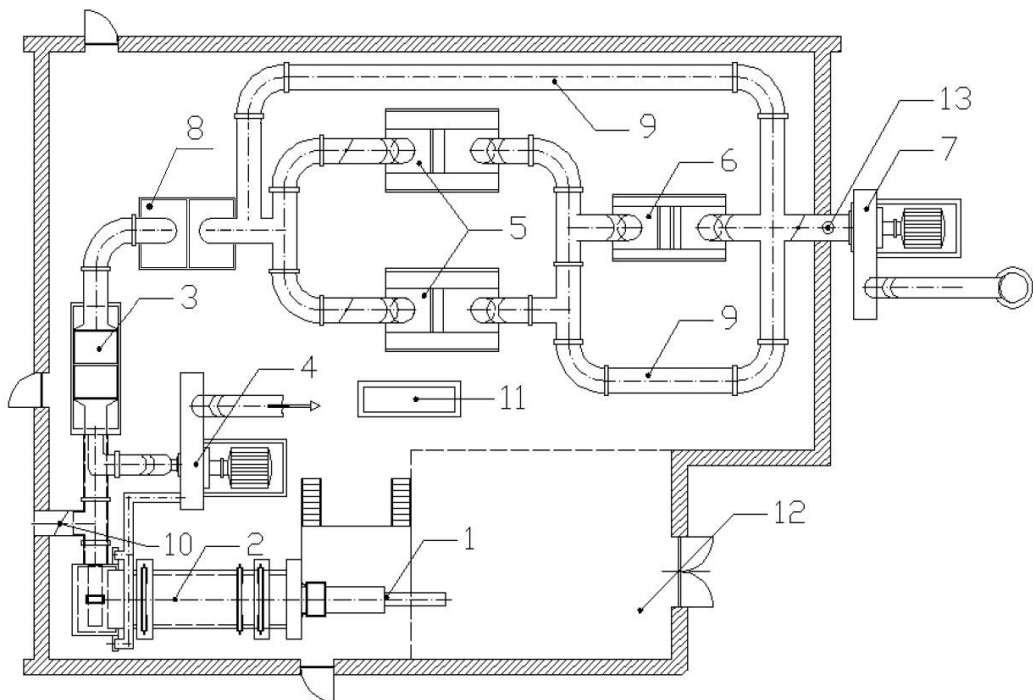
Výhodou této metody je nulový vznik odpadní vody. Naopak mezi značné nevýhody patří zpracování vyprodukovaného prachu se zachycenými kyselými složkami a těžkými kovy. Účinnost je přibližně 50% při nástřiku 5-10kg vápna na 1 tunu zpracovaného odpadu.

7. SPALOVNA RADIOAKTIVNÍHO ODPADU S ROTAČNÍ PECÍ

Každá spalovna RAO by měla zajišťovat tyto technologické funkce:

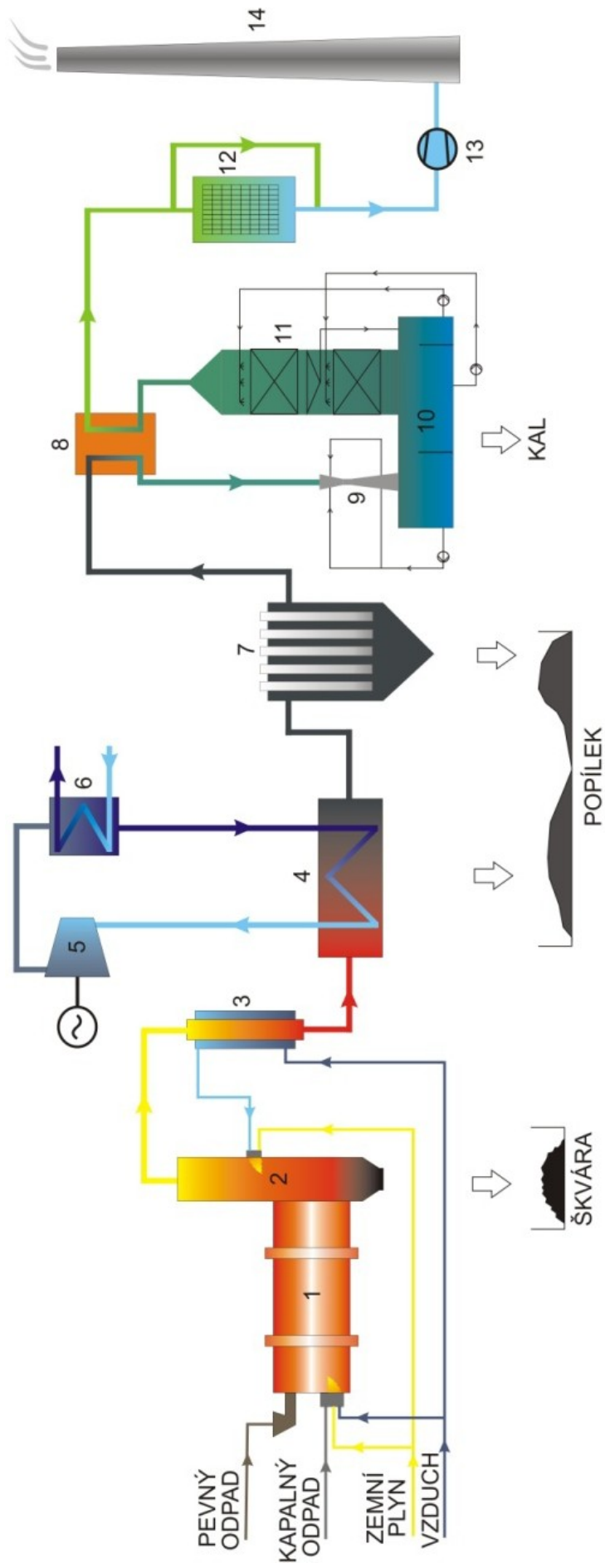
- Příjem a příprava RAO
- Skladování a dávkování RAO
- Spalování RAO
- Využití energie
- Environmentální problematika
 - Čištění a vypouštění spalin
 - Odstraňování tuhých zbytků

Spalovnu tvoří rotační pec s dohořivací komorou, dávkovací zařízení, chladič spalin a systém čištění spalin. Technické schéma spalovny RAO s rotační pecí je na obr. 7.1 a typické uspořádání aparátů spalovny na obr. 7.2.



Obr. 7.1 Technické schéma spalovny RAO s rotační pecí [11]

1 – Dávkovací zařízení, 2 – Rotační pec s dohořivací komorou, 3 – Trubkový chladič spalin, 4 – Vzduchový ventilátor, 5 – Tkaninové filtry společnosti Donaldson, 6 – Absolutní HEPA filtr od společnosti SFM filtry, 7 – Spalinový ventilátor, 8 – Pračka spalin společnosti Termizo as., 9 – Obtok spalin, 10 – Směšovací klapka, 11 – Ovládací panel, 12 – Místo uložení RAO, 13 – Měření radiace



Obr. 7.2 Typické uspořádání aparátů spalovny R.A.C [34]

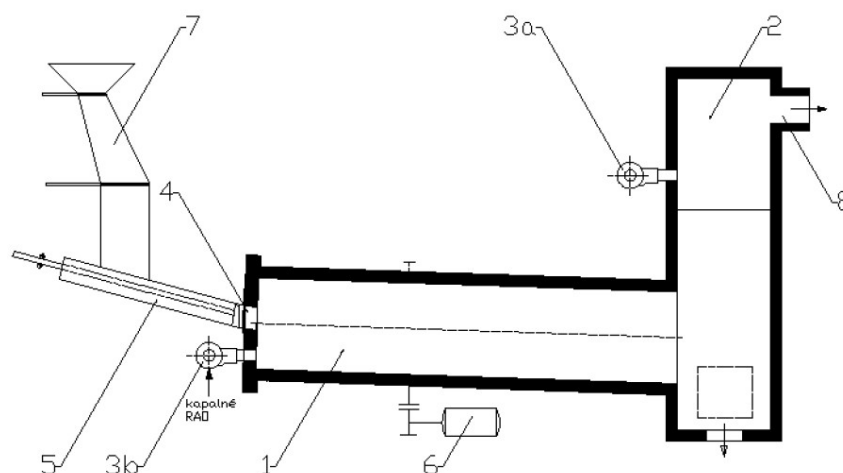
- 1 – Rotační pec, 2 – Dohořivací komora, 3 – Tepelný výměník, 4 – Kotel na odpadní teplo, 5 – Parní turbína, 6 – Kondenzátor, 7 – Filtř,
- 8 – Tepelný výměník, 9 – Venturiho trubice, 10 – Cirkulační nádrž, 11 – Absorpční kolona, 12 – Absorbér, 13 – Ventilátor, 14 - Komin

7.1 Rotační pec

Rotační pece jsou univerzální zařízení pro spalování klinických a nebezpečných odpadů. V přední části pece je dávkovací a podávací (šnekové, lisovací) zařízení sloužící pro přívod odpadu. Následuje vstupní čelo se zabudovaným zapalovacím hořákem, hořákem pro dávkování kapalného RAO a otvory pro přívod spalovacího vzduchu a odpadu určeného pro spálení. Odpad dále putuje do spalovací pece, což je vyzděný, pomalu rotující válec se sklonem 2° až 7°. Sklon a rotace zajišťují rovnoměrné hoření a promíchávání odpadů, lepší přístup spalovacího vzduchu (nedochází ke spékání) a určuje dobu zdržení odpadu v peci (30 – 90min). Spalovací teplota je 850 – 1300 °C a teplo se přenáší všemi třemi způsoby:

- Sdílením ze spalin na odpad
- Sáláním plamene na odpad i odkrytou část vyzdívky
- Vedením z horké vyzdívky do lože odpadu

Za rotační pecí navazuje dohořivací komora válcového nebo obdélníkového tvaru, kde vyhoří všechny spalitelné zbytky. V horní části je umístěný stabilizační hořák a ve spodní části je zařízení na vyvážení popele.

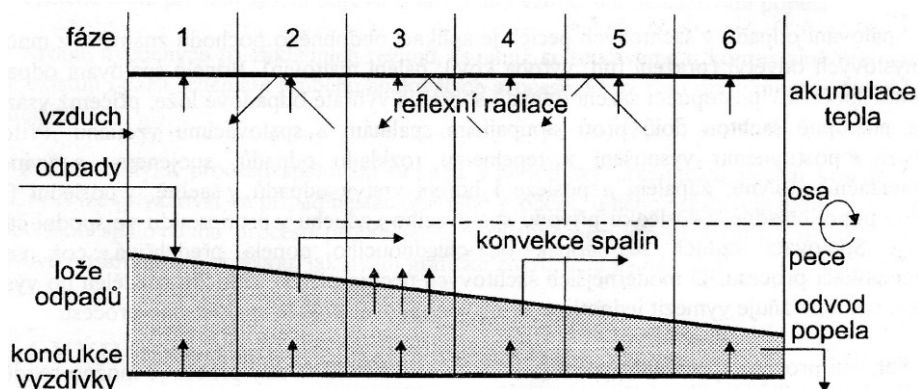


Obr. 7.3 Schéma rotační pece na spalování RAO [11]

1 – Spalovací prostor, 2 – Dohořivací komora, 3a – Stabilizační hořák, 3b – Zapalovací hořák a hořák na dávkování kapaln. RAO, 4 – Plnicí otvor, 5 – Podávací zařízení, 6 – Pohon a sklápění, 7 – dávkování RAO, 8 – odvod spalin

7.1.1 Spalování v rotační peci

Spalovací proces v rotační peci se dělí do šesti fází viz. obr. 7.1



Obr. 7.4 Schéma spalování v rotační peci [1]

1. fáze - vysoušení

V důsledku postupného nahřívání způsobeného přenosem tepla zářením, vedením i kondukcí dochází k odstranění vlhkosti odpadu.

2. fáze – zplyňování

Při teplotách 300 – 600 °C postupně přecházejí hořlavé látky na těkavé složky a vázaný uhlík.

3. fáze – zapálení

Vzněcováním karbonizačního plynu vznikají lokální ohniska hoření, které se otáčením pece postupně rozšiřují po povrchu odpadového lože.

4. fáze - prohořívání

Při teplotě okolo 800°C se karbonizační plyn dostává do vnitřních vrstev odpadového lože a odpad prohořívá ve větších hloubkách.

5. fáze – hoření

Postupným hořením dalších vrstev se teplota zvyšuje na 1100 – 1300 °C.

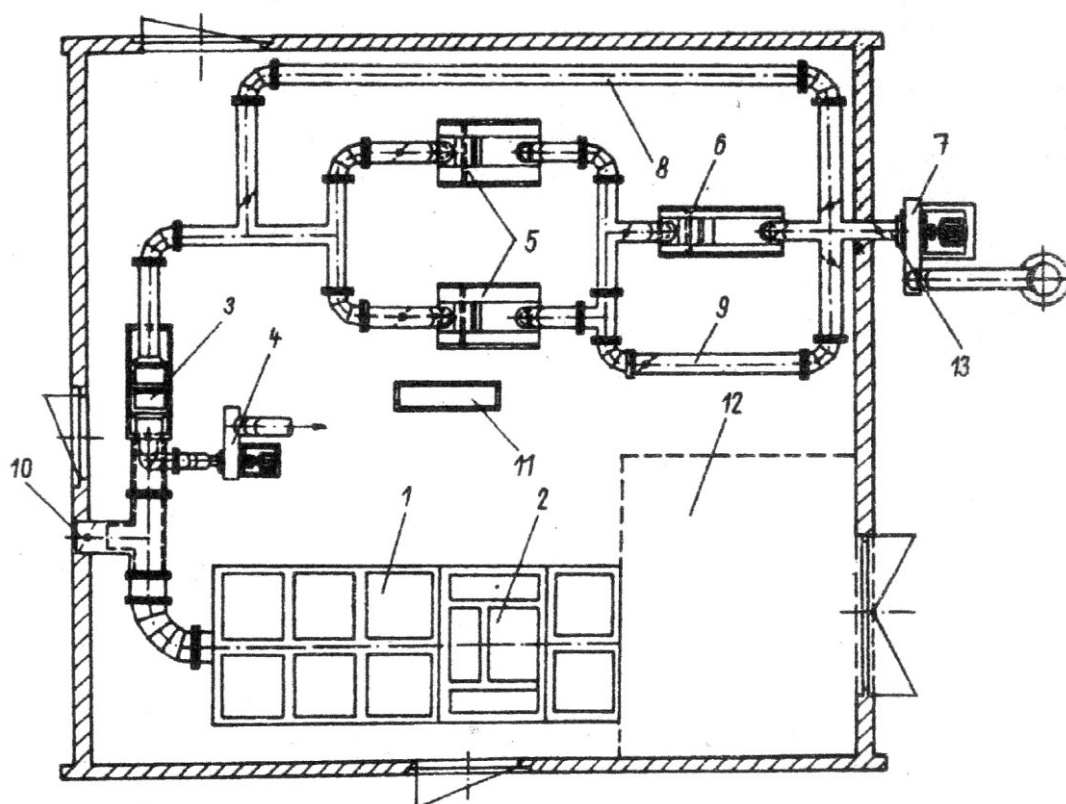
6. fáze – dohořívání

Probíhá spalování zbytku hořlavého odpadu se zbytkem spalovacího vzduchu.

8. SPALOVNA RADIOAKTIVNÍHO ODPADU S PYROLYTICKOU PECÍ

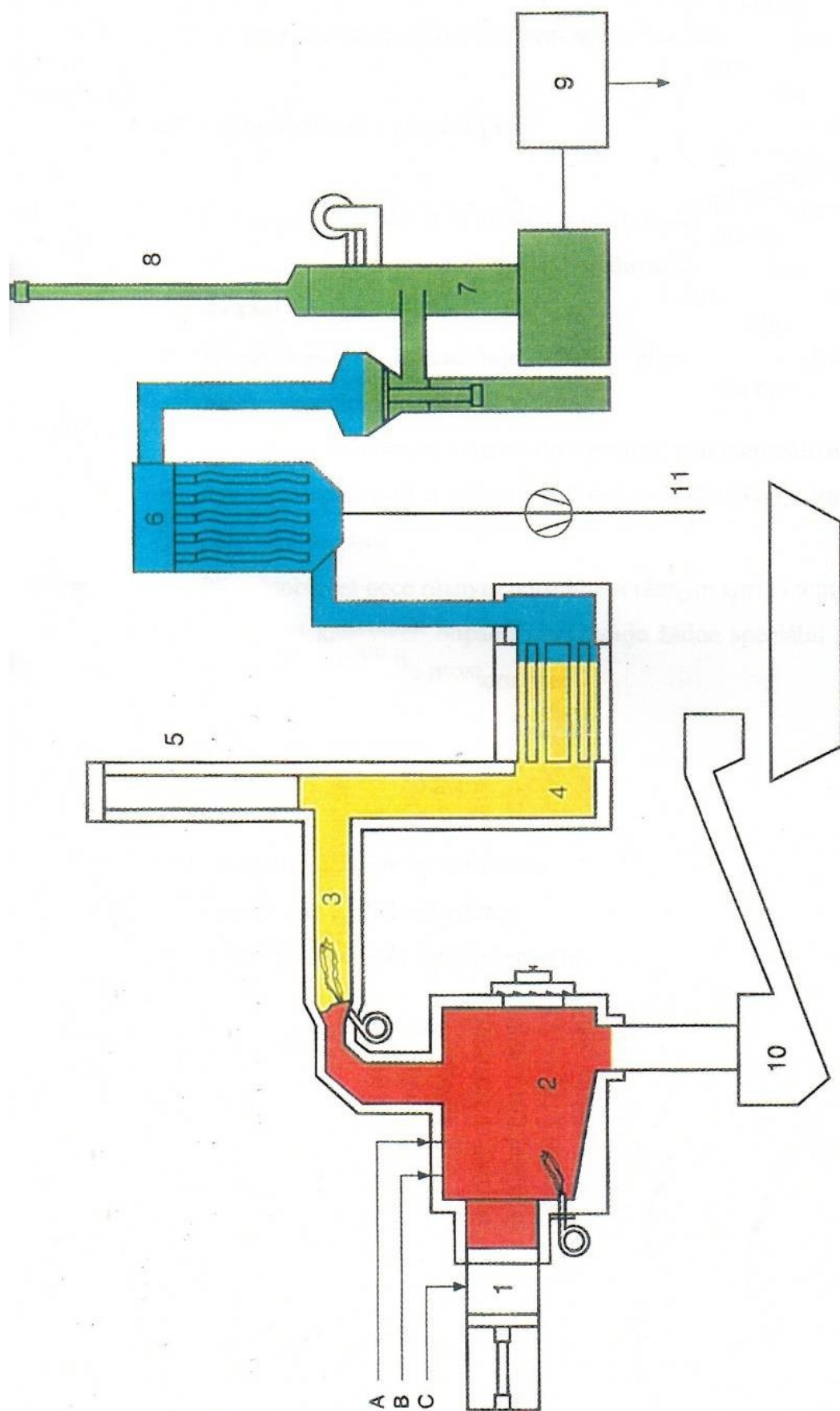
Spalovna RAO s pyrolytickou pecí zajišťuje stejné technologické funkce jako spalovna s rotační pecí, tedy příjem a přípravu RAO, skladování RAO a jeho spalování, následné využití energie a problematiku čištění spalin a odstraňování tuhých zbytků.

Spalovnu tvoří pyrolytická pec s dohořivací komorou, dávkovací zařízení, chladič spalin a systém čištění spalin. Technické schéma spalovny radioaktivního odpadu s pyrolytickou pecí je na obr. 8.1 a typické uspořádání aparátů spalovny na obr. 8.2.



Obr. 8.1 Technické schéma spalovny RAO s pyrolytickou pecí [3]

1 – Pyrolytická pec, 2 – Dávkovací zařízení, 3 – Chladič spalin, 4 – Vzduchový ventilátor, 5 – Tkaninové filtry, 6 – Absolutní filtr, 7 – Spalinový ventilátor, 8 – Obtok spalin I, 9 – Obtok spalin II, 10 – Směšovací klapka, 11 – Ovládací panel, 12 – Místo uložení RAO, 13 – Měření radiace



Obr. 8.1 Typické uspořádání aparátů spalovny RAO [12]

1 – Podávací zařízení, 2 – Spalovací komora, 3 – Pyrolyzní komora, 4 – Výměník tepla, 5 – Havarijní komín, 6 – Filtér spalin, 7 – Třístupňová pračka spalin, 8 – Komín čistých spalin, 9 – Podávání kapalných odpadů, 10 – Odpadelní filtr, 11 – Odpočetelní filtr, A – Vstřikovávání vody, B – Podávání pevných odpadů, C – Podávání kapalných odpadů

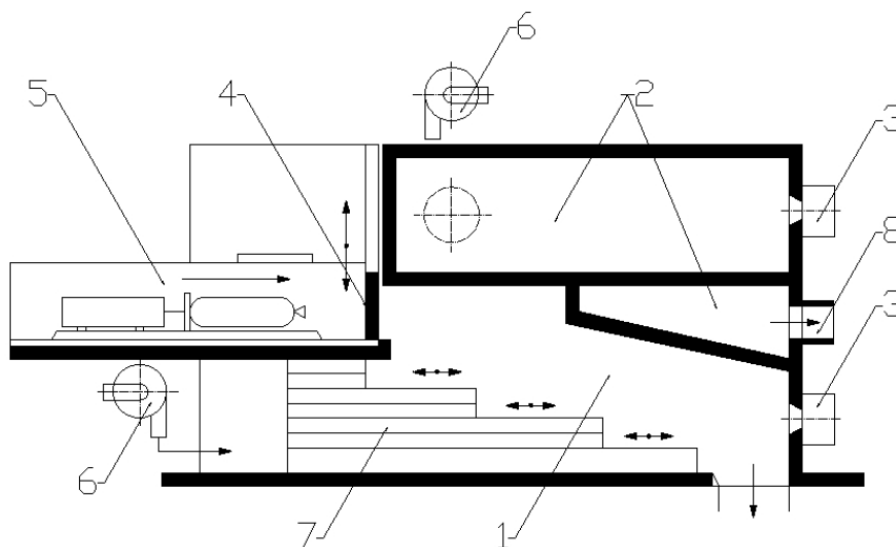
8.1 Pyrolytická pec

Při pyrolýze na vstupní materiál působí teplota, která přesahuje hranici jeho chemické stability. Dochází k termickému rozkladu organických složek bez přístupu oxidačního činidla, čímž je kyslík, vzduch nebo jiné zplyňovací látky.

Při teplotách do 150 °C přejde fyzikálně vázaná voda do plynné fáze. Jelikož je to energeticky náročný proces, předradí se reaktoru lis, popřípadě při velkém množství vody v materiálu sušící agregát. Mezi 300 až 500 °C dochází ke karbonizaci, při které vzniká uhlík, plyn a kapalné uhlovodíky. Nad 500 °C se vzniklé produkty dále štěpí a vzniká stabilní plynný vodík, metan, oxid uhličitý a uhelnatý.

Výhody pyrolýzy [28]

- Výroba paliv (koks, olej, plyn) nebo hodnotných produktů (vodík, syntézní plyn)
- Významné snížení objemu plynu k čištění
- Zpětné získání železných a neželezných kovů a nitrifikovaného inertu ze zbytku
- Nižší provozní náklady
- Použitelnost pro nižší jednotky



Obr. 8.3 Schéma pyrolýzní pece na spalování RAO [3]

1 – Pyrolýzní prostor pece, 2 – Dohořivací komora, 3 – Stabilizační hořák, 4 – Plnicí otvor, 5 – Podávací zařízení, 6 – Přívod vzduchu, 7 – Přesuvný rošt, 8 – Odvod spalin

9. SPALOVACÍ VÝPOČTY

9.1 Celková výhřevnost odpadu

Pro výpočet celkové účinnosti je nutné znát složení a výhřevnost jednotlivých složek. Hodnoty jsou uvedené v tab. 9.1.

	složení [%]	výhřevnost $Q_i [MJ \cdot kg^{-1}]$
Směs dřeva	18,5	16,1
Směs papíru	15	16,5
Pryž	4	35
Textil	29	16,3
Polystyren	7,5	39,6
Polyethylen	18	43,4
Polypropylen	3	44
PVC	5	18,9

Tab. 9.1 Složení a výhřevnost spalovaného odpadu

$$Q_{iC} = \sum_{i=1}^8 x \cdot Q_i$$

$$Q_{iC} = 0,185 \cdot 16,1 + 0,15 \cdot 16,5 + 0,04 \cdot 35 + 0,29 \cdot 16,3 + 0,075 \cdot 39,6 + 0,18 \cdot 43,4 + 0,03 \cdot 44 + 0,05 \cdot 18,9$$

$$Q_{iC} = 24,627 MJ \cdot kg^{-1} = \underline{24627 kJ \cdot kg^{-1}}$$

9.2 Spotřeba spalovacího vzduchu pro odpad

Počítáme podle Rosin-Freslingova vztahu, kde pro tuhá paliva jsou konstanty

$$K_1 = 1,012 m_N^3 \cdot kg^{-1} \text{ a } K_2 = 0,5 m_N^3 \cdot kg^{-1}.$$

$$V_{vz,t}^s = K_1 \cdot \frac{Q_{iC}}{4186,7} + K_2 = 1,012 \cdot \frac{24627}{4186,7} + 0,5$$

$$V_{vz,t}^s = \underline{6,453 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Skutečné množství suchého spalovacího vzduchu

Volím přebytek vzduchu $n=1,35$.

$$V_{vz,sk}^s = n \cdot V_{vz,t}^s = 1,35 \cdot 6,453$$

$$V_{vz,sk}^s = \underline{8,712 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Součinitel vlhkosti χ_v závisí na: [11]

- relativní vlhkosti $\varphi = 20\%$
- celkovém tlaku $p_C = 101325 Pa$
- parciálním tlaku vodní páry $p'' = 0,1 MPa$

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_C - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} = 1 + \frac{20}{100} \cdot \frac{0,1}{0,101325 - \frac{20}{100} \cdot 0,1}$$

$$\chi_v = \underline{1,246}$$

Skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu

$$V_{vz,sk}^v = \chi_v \cdot V_{vz,sk}^v = 1,246 \cdot 8,712$$

$$V_{vz,sk}^v = \underline{10,855 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

9.3 Skutečné množství vlhkých spalin z odpadu

Počítáme podle Rosin-Freslingova vztahu, kde pro tuhá paliva jsou konstanty

$$K_3 = 0,95 m_N^3 \cdot kg^{-1} \text{ a } K_4 = 1,375 m_N^3 \cdot kg^{-1}.$$

$$V_{sp,t}^s = K_3 \cdot \frac{Q_{iC}}{4186,7} + K_4 = 0,95 \cdot \frac{24627}{4186,7} + 1,375$$

$$V_{sp,t}^s = \underline{6,963 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Skutečné množství suchých spalin

$$V_{sp,sk}^s = V_{sp,t}^s + (n-1) \cdot V_{vz,t}^s = 6,963 + (1,35-1) \cdot 6,453$$

$$V_{sp,sk}^s = \underline{9,221 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Množství vody ve spalinách

Množství vody v odpadu se pohybuje v rozmezí 0-20% a obsah vodíku 5-10%. Volím obsah vody 15% a obsah vodíku 9%.

$$V_{H_2O} = \frac{22,4}{2} \cdot H_2 + \frac{22,4}{18} \cdot w + (\chi_v - 1) \cdot V_{vz,sk}^s = \frac{22,4}{2} \cdot 0,09 + \frac{22,4}{18} \cdot 0,15 + (1,246 - 1) \cdot 8,712$$

$$V_{H_2O} = \underline{3,338 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

Skutečné množství vlhkých spalin

$$V_{sp,sk}^v = V_{sp,sk}^s + V_{H_2O} = 9,221 + 3,338$$

$$V_{sp,sk}^v = \underline{12,559 m_N^3 \cdot kg^{-1}}$$

9.4 Skutečné množství spalovacího vzduchu pro přídatný plyn

Volím zemní plyn dodávaný z Norska s výhřevností $Q_{ip} = 37,59 MJ \cdot m_N^{-3}$ a složením uvedeným v tabulce tab. 8.2.

Složka	Množství [%]
Methan CH_4	85,8
Ethan C_2H_6	8,49
Propan C_3H_8	2,3
Butan C_4H_{10}	0,7
Pentan C_5H_{12}	0,25
Dusík N_2	0,96
Oxid uhličitý CO_2	1,5

Tab. 9.2 Chemické složení zemního plynu [32]

Množství spalovacího kyslíku

$$V_{O_{2,t,pl}} = \sum \left(x + \frac{y}{4} \right) \cdot C_x H_y = 2 \cdot 0,858 + 3,5 \cdot 0,0849 + 5 \cdot 0,023 + 6,5 \cdot 0,007 + 8 \cdot 0,0025$$

$$V_{O_{2,t,pl}} = \underline{2,194 m_N^3 \cdot m_N^{-3}}$$

Teoretické množství suchého spalovacího vzduchu

$$V_{vz,t,pl}^s = \frac{V_{O_{2,t,pl}}}{0,21} = \frac{2,194}{0,21}$$

$$V_{vz,t,pl}^s = \underline{10,448 m_N^3 \cdot m_N^{-3}}$$

Skutečné množství suchého spalovacího vzduchu

Volím přebytek pro plyn $n_{pl} = 1,05$

$$V_{vz,sk,pl}^s = V_{vz,t,pl}^s \cdot n_{pl} = 10,448 \cdot 1,05$$

$$V_{vz,sk,pl}^s = \underline{10,97 m_N^3 \cdot m_N^{-3}}$$

Skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu

$$V_{vz,sk,pl}^v = V_{vz,sk,pl}^s \cdot \chi_v = 10,97 \cdot 1,246$$

$$V_{vz,sk,pl}^v = \underline{13,669 m_N^3 \cdot m_N^{-3}}$$

9.5 Skutečné množství spalin z plynu

Teoretický objem suchých spalin

$$V_{sp,t,pl}^s = V_{CO_2} + V_{N_2} = CO_2 + \sum x \cdot C_x H_y + N_2 + 0,79 \cdot V_{vz,t,pl}^s$$

$$V_{sp,t,pl}^s = [0,015 + (0,858 + 2 \cdot 0,0849 + 3 \cdot 0,023 + 4 \cdot 0,007 + 5 \cdot 0,0025)] + (0,0096 + 0,79 \cdot 10,448)$$

$$V_{sp,t,pl}^s = \underline{9,416 m_N^3 \cdot m_N^{-3}}$$

Skutečný objem suchých spalin

$$V_{sp,sk,pl}^s = V_{sp,t,pl}^s + (n_{pl} - 1) \cdot V_{vz,t,pl}^s = 9,416 + (1,05 - 1) \cdot 10,448$$

$$V_{sp,sk,pl}^s = \underline{9,938 m_N^3 \cdot m_N^{-3}}$$

Množství vody ve spalinách

$$V_{H_2O,pl} = \sum_1^5 \frac{y}{2} \cdot C_x H_y + (\chi_v - 1) \cdot V_{vz,sk,pl}^s$$

$$V_{H_2O,pl} = (2 \cdot 0,858 + 3 \cdot 0,0849 + 4 \cdot 0,023 + 5 \cdot 0,007 + 6 \cdot 0,0025) + (1,246 - 1) \cdot 10,97$$

$$V_{H_2O,pl} = \underline{4,811 m_N^3 \cdot m_N^{-3}}$$

Skutečný objem vlhkých spalin

$$V_{sp,sk,pl}^v = V_{sp,sk,pl}^s + V_{H_2O} = 9,938 + 4,811$$

$$V_{sp,sk,pl}^v = \underline{14,749 m_N^3 \cdot m_N^{-3}}$$

9.6 Celkový normální průtok spalin

Volím parametry pro výpočet:

- hmotnost jedné dávky odpadu $m_O = 9 \text{ kg}$
- interval dávkování odpadu $\tau = 5 \text{ min}$
- provozní spotřeba plynu $\dot{V}_p = 0,01 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

$$\dot{V}_{sp,c,n} = V_{sp,sk}^v \cdot \frac{m_O}{\tau} + V_{sp,sk,pl}^v \cdot \dot{V}_p = 12,559 \cdot \frac{9}{5 \cdot 60} + 14,749 \cdot 0,01$$

$$\dot{V}_{sp,c,n} = \underline{0,524 m_N^3 \cdot s^{-1}}$$

9.7 Teplo odvedené spalinami a skutečný tok vlhkých spalin za spalovací komorou

Celkový tepelný příkon z odpadu

$$P_c = \dot{m}_{pal} \cdot Q_{iC} = \frac{125}{3600} \cdot 24627$$

$$P_c = \underline{855,1 kW}$$

Celkový tepelný příkon z plynu

$$P_{c,pl} = \dot{V}_p \cdot Q_{ip} = 0,01 \cdot 37590$$

$$P_{c,pl} = \underline{375,9 kW}$$

Teplo odvedené spalinami

$$P_{sp} = P_c + P_{c,pl} = 855,1 + 375,9$$

$$P_{sp} = \underline{1231 kW}$$

Objemový tok vlhkých spalin z odpadu

$$\dot{V}_{sp,obj} = V_{sp,sk}^v \cdot \dot{m}_{pal} = 12,559 \cdot \frac{125}{3600}$$

$$\dot{V}_{sp,obj} = \underline{0,436 m_N^3 \cdot s^{-1}}$$

Objemový tok vlhkých spalin z plynu

$$\dot{V}_{sp,obj,pl} = V_{sp,sk,pl}^v \cdot \dot{V}_p = 14,749 \cdot 0,01$$

$$\dot{V}_{sp,obj,pl} = \underline{0,147 m_N^3 \cdot s^{-1}}$$

10. NÁVRH SPALOVACÍ PECE

10.1 Výpočet teploty za spalovací komorou

Volím teplotu na výstupu z chladiče $t_2 = 220^\circ\text{C}$ a na výstupu ze spalovací komory $t_1 = 1000^\circ\text{C}$ a. Rozdíl entalpií stanovím pomocí funkce $i = 1,370816786 \cdot t + 0,000158951 \cdot t^2$.

$$i_1 = 1,370816786 \cdot t_1 + 0,000158951 \cdot t_1^2 = 1,370816786 \cdot 1000 + 0,000158951 \cdot 1000^2$$
$$i_1 = \underline{1529,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$i_2 = 1,370816786 \cdot t_2 + 0,000158951 \cdot t_2^2 = 1,370816786 \cdot 220 + 0,000158951 \cdot 220^2$$
$$i_2 = \underline{309,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\Delta i = i_1 - i_2 = 1529,8 - 309,3$$

$$\Delta i = \underline{1220,5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Měrné teplo spalin

$$c_{sp} = \frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{1220,5}{1000 - 220}$$

$$c_{sp} = \underline{1,565 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Skutečná teplota spalin za spalovací komorou

Volím ztráty sáláním, vedením a odvodem tuhých zbytků $z=0,2$

$$(\dot{m}_{pal} \cdot Q_{iC} + \dot{V}_p \cdot Q_{i,pl}) \cdot (1 - z) = \dot{V}_{sp,obj} \cdot c_{sp} \cdot t_{sp,1} + \dot{V}_{sp,obj,pl} \cdot c_{sp} \cdot t_{sp,1}$$

$$t_{sp,1} = \frac{(\dot{m}_{pal} \cdot Q_{iC} + \dot{V}_p \cdot Q_{ip}) \cdot (1 - z)}{(\dot{V}_{sp,obj} + \dot{V}_{sp,obj,pl}) \cdot c_{sp}} = \frac{\left(\frac{125}{3600} \cdot 24627 + 0,01 \cdot 37590 \right) \cdot (1 - 0,2)}{(0,436 + 0,147) \cdot 1,565}$$

$$t_{sp,1} = \underline{1079,4^\circ\text{C}}$$

Tepelný výkon

$$Q = \dot{V}_{sp,c,n} \cdot \Delta i = 0,524 \cdot 1220,5$$

$$Q = \underline{639,5 \text{ kW}}$$

10.2 Rozměry spalovací komory

Volím spalovací teplotu ve spalovací komoře $t_{sk} = 1000^{\circ}\text{C}$.

Skutečný tok vlhkých spalin

$$\dot{V}_{SP,SK} = \dot{V}_{sp,obj} \cdot \frac{T_{sk}}{T_N} = 0,436 \cdot \frac{(1000 + 273,15)}{273,15}$$

$$\dot{V}_{SP,SK} = \underline{2,032 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}}$$

Objem spalovací komory

Volím dobu spalin ve spalovací komoře $\tau_{sk} = 1,3\text{s}$

$$V_{SK} = \dot{V}_{SP,SK} \cdot \tau_{sk} = 2,032 \cdot 1,3$$

$$V_{SK} = \underline{2,64 \text{ m}^3}$$

Délka spalovací komory bez vyzdívky

Volím vnitřní průměr spalovací komory $d_{sk} = 1,2\text{m}$

$$l_{sk} = \frac{4 \cdot V_{SK}}{\pi \cdot d_{sk}^2} = \frac{4 \cdot 2,64}{\pi \cdot 1,2^2}$$

$$l_{sk} = \underline{2,3\text{m}}$$

Průřez spalovací komorou

$$S_{sk} = \frac{\pi \cdot d_{sk}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,2^2}{4}$$

$$S_{sk} = \underline{1,13 \text{ m}^2}$$

Průměrná rychlost spalin ve spalovací komoře

$$w_{sp,sk} = \frac{\dot{V}_{SP,SK}}{S_{SK}} = \frac{2,032}{1,13}$$

$$w_{sp,sk} = \underline{1,798 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}$$

Kontrola doby zdržení spalin

$$\tau_{sk,s} = \frac{l_{sk}}{w_{sp,sk}} = \frac{2,3}{1,798}$$

$$\tau_{sk,s} = \underline{1,3s}$$

$$\tau_{sk,s'} = \tau_{sk}$$

10.3 Rozměry dohořivací komory

Volím spalovací teplotu v dohořivací komoře $t_{dk} = 1200^{\circ}\text{C}$.

Skutečný tok vlhkých spalin

$$\dot{V}_{SP,DK} = (\dot{V}_{sp,obj} + \dot{V}_{sp,obj,pl}) \cdot \frac{T_{DK}}{TN} = (0,436 + 0,147) \cdot \frac{(1200 + 273,15)}{273,15}$$

$$\dot{V}_{SP,DK} = \underline{3,14m^3 \cdot s^{-1}}$$

Objem dohořivací komory

Volím dobu spalin v dohořivací komoře $\tau_{dk} = 2,4s$.

$$V_{DK} = \dot{V}_{SP,DK} \cdot \tau_{dk} = 3,14 \cdot 2,4$$

$$V_{DK} = \underline{7,6m^3}$$

Délka dohořivací komory

Volím vnitřní průměr dohořivací komory $d_{dk} = 1,5m$.

$$l_{dk} = \frac{4 \cdot V_{DK}}{\pi \cdot d_{dk}^2} = \frac{4 \cdot 7,6}{\pi \cdot 1,5^2}$$

$$l_{dk} = \underline{4,3m}$$

Průřez dohořivací komorou

$$S_{dk} = \frac{\pi \cdot d_{dk}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 1,5^2}{4}$$

$$S_{dk} = \underline{1,77m^2}$$

Průměrná rychlost spalin v dohořivací komoře

$$w_{sp,dk} = \frac{\dot{V}_{SP,DK}}{S_{dk}} = \frac{3,14}{1,77}$$

$$w_{sp,dk} = \underline{1,77 m \cdot s^{-1}}$$

Kontrola doby zdržení spalin

$$\tau_{dk,s} = \frac{l_{dk}}{w_{sp,dk}} = \frac{4,3}{1,77}$$

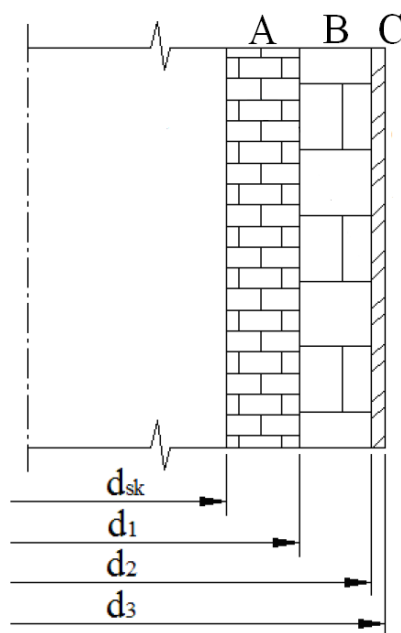
$$\tau_{dk,s} = \underline{2,4 s}$$

$$\tau_{sk,s'} = \tau_{sk}$$

10.4 Vyzdívka spalovací komory

Vyzdívka spalovací komory se dá rozdělit do tří úseků. Pro chladnější úsek při vstupu do pece, který je nejvíce namáhán mechanickým otěrem, se doporučuje šamotový LCC žárobeton s vysokou hutností a pevností. Prostřední část pece při vzniku taveniny s výrazně nízkou viskozitou je znehodnocována korozí a ve výpadové části pece se tvoří nálepy.

Pro všechny tři části navrhuji nízkocementový materiál NOVOBET 1500 (A), izolační vrstvu IZOKER IZ05 (B) a tenký ocelový plášť (C), jak je zobrazeno na obr. 9.1.



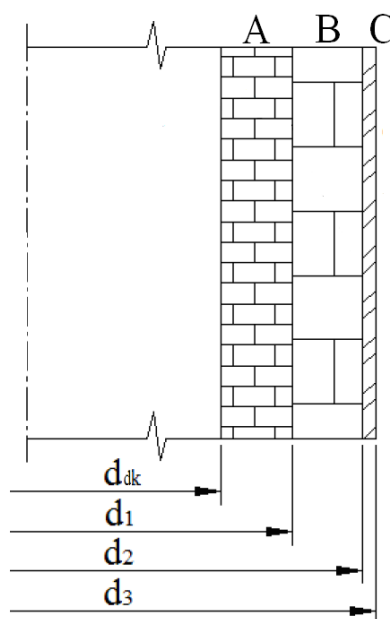
Obr. 10.1 Návrh vyzdívky pro spalovací komoru

	NOVOBET 1500	IZOKER IZ05
Klasifikační teplota	1500 °C	1100 °C
Teplota výpalu	800 °C	-
Pevnost v tlaku	min 80MPa	min 1MPa
Délkové změny	max – 0,3%	± 1%
Pórovitost	15%	-
Zrnitost	0-6mm	-
Tepelná vodivost (1000 °C)	$2,1 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	$0,283 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Únosnost v žáru	min 1470 °C	1380 °C

Tab. 10.1 Vlastnosti vyzdívky spalovací komory [26,24]

10.5 Vyzdívka dohořivací komory

Pro dohořivací komoru pece navrhují stejnou vyzdívku jako u spalovací komory s tím rozdílem, že navrhují izolační vrstvu IZOKER IZ15 (B).



Obr. 10.2 Návrh vyzdívky pro dohořivací komoru

	IZOKER IZ15
Klasifikační teplota	1400 °C
Pevnost v tlaku	min 10MPa
Délkové změny	± 1,5%
Tepelná vodivost (1000 °C)	$1,1 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
Únosnost v žáru	1740 °C

Tab. 10.2 Vlastnosti vyzdívky dohořivací komory [25]

11. ZÁVĚR

Díky plánovaným výstavbám nových bloků jaderných elektráren Dukovany a Temelín je nutné počítat s nárůstem nízko aktivního odpadu. Vzniku tohoto odpadu nezabráníme, ale naším cílem je jeho množství minimalizovat. Účinnou a rychlou metodou odstranění je spalování, které může probíhat buď v rotační nebo pyrolytické peci. Spalováním odpadů dosáhneme rychlé objemové a hmotnostní redukce a tuhého sterilního zbytku. Značnou výhodou je možnost využití vyprodukovaného tepla k výrobě páry nebo teplé užitkové vody.

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout rotační pec s dohořivací komorou pro spalovnu nízko aktivního radioaktivního odpadu o mnou zvoleném výkonu $125 \text{ kg} \cdot \text{hod}^{-1}$. Odpad je tvořen hlavně textílem, směsí dřeva a papíru, polyethylenem a dalším materiálem, který vznikl v jaderné elektrárně.

V první fázi návrhu jsem provedl spalovací výpočty, kde výše uvedený spalovaný odpad o výhřevnosti $24,6 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ má celkový tepelný příkon $855,1 \text{ kW}$ a přídavný zemní plyn dodávaný z Norska o výhřevnosti $37,6 \text{ MJ} \cdot \text{m}_N^{-3}$ má celkový tepelný příkon 376 kW .

V další fázi jsem navrhl rozměry spalovací a dohořivací komory včetně materiálu vyzdívky. Odpad je spalován při teplotě $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ve spalovací komoře o průměru 2 m a délce $3,1 \text{ m}$. Vzniklé spaliny putují do dohořivací komory, kde se při teplotě $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ zdrží $2,4 \text{ s}$. Vyzdívka rotační pece se skládá z 300 mm nízko-cementového materiálu NOVOBET 1500, 400 mm izolační vrstvy IZOKER IZ05 a tenkého 100 mm ocelového pláště. U dohořivací komory je vyzdívka téměř totožná s vyzdívkou rotační pece. Jen izolační vrstvu kvůli vyšší teplotě jsem upravil na IZOKER IZ15.

Jako vhodnou metodu čištění spalin navrhuji kombinaci tkaninového filtru, pračky spalin a absolutního HEPA filtru.

V poslední fázi jsem pomocí vytvořeného programu v Microsoft Excel vypočítal prostup tepla stěnou rotační i dohořivací komory. Teplota vnějšího pláště rotační komory je $100,4 \text{ }^\circ\text{C}$ a dohořivací komory $115,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Obě tyto teploty splňují bezpečnostní podmínky výrobce.

12. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] OBROUČKA, Karel. *Termické odstraňování a energetické využívání odpadů*. VŠB-TU Ostrava 2001, 140s. ISBN 80-248-0009-8.
- [2] JUCHELKOVÁ, Dagmar. *Odpady, vedlejší produkty a nakládání s nimi*. VŠB-TU Ostrava 2005, 98s. ISBN 80-248-0753-X.
- [3] TOMČALA, Jiří, KOLÁT, Pavel. *Likvidace radioaktivních odpadů spalováním*. *Jaderná energie*, 1/1900, s. 32-35.
- [4] ŠTORCH, Otakar a kolektiv. *Čištění průmyslových plynů a exhalací odlučovači*. SNTL Praha 1976, 312s.
- [5] BRETSCHNEIDER, Boris, KUNFURST, Jiří. *Technika ochrany ovzduší*. 1.vyd. SNTL Praha 1978, 260s.
- [6] ČERNÝ, Václav a kolektiv. *Parní kotle a spalovací zařízení*. SNTL Praha 1975, 526s.
- [7] RYBÍN, Miroslav. *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. SNTL Praha 1978, 420s.
- [8] Materiály prof. Ing. Pavla Kolata, DrSc.
- [9] Materiál společnosti ČEZ. a.s. *Radioaktivní odpady a skupina ČEZ*.
- [10] FRANTÍK, Jaroslav. *Návrh spalovny radioaktivních odadů*. Ostrava 2008. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
- [11] BERÁNEK, Jakub. *Spalovny radioaktivních odadů*. Ostrava 2010. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
- [12] KARMAZINOVÁ, Nad'a. *Návrh rotační pece pro spalovnu průmyslových odpadů*. Ostrava 2003. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.
- [13] KUBÍČEK, Jan. *Moderní metody mokrého čištění spalin*. Brno 2010. Vedoucí diplomové práce Ing. Radek Dvořák, Ph.D.
- [14] <http://www.fs.vsb.cz/euprojekty/414/parni-kotle.pdf>
- [15] <http://astronuklfyzika.cz/JadRadFyzika2.htm>
- [16] <http://fyzmatik.pise.cz/76446-druhy-radioaktivniho-zareni-song.html>
- [17] http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=3.3.4
- [18] <http://www.jaderny-odpad.cz/ukladani-jaderneho-odpadu.htm>

- [19] <http://odpady.ihned.cz/c1-20893840-institucionalni-radioaktivni-odpady>
- [20] <http://www.energyweb.cz/web/rao/sk/31.htm>
- [21] <http://odpady.tf.czu.cz/p/Spalov.pdf>
- [22] <http://www.trinomprerov.cz/produkty/spalovny-odpadu/>
- [23] <http://www.prumyslova-keramika.cz/data/File/pdf/clanky-pps-pdf/04.pdf>
- [24] http://www.seeifceramic.cz/media/mat_listy/z03/IZ05.pdf
- [25] http://www.seeifceramic.cz/media/mat_listy/z03/IZ15.pdf
- [26] http://www.prumyslova-keramika.cz/data/File/pdf/ml/NOVOBET_1500.pdf
- [27] ekologie.upol.cz/ku/ppto/tozp2.doc
- [28] http://www.opzp.cz/soubor-ke-stazeni/36/10821-003_pyrolyza_i.pdf
- [29] http://www1.vsb.cz/ke/vyuka/FRVS/CD_Biomasa_nove/Pdf/Pyrolyza.pdf
- [30] http://ceg.fsv.cvut.cz/vyzkum/radioaktivni-odpady/problematika-odpadu-cr?set_language=cs
- [31] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/842-radioaktivni-odpad>
- [32] <http://www.tzb-info.cz/tabulky-a-vypocty/89-slozeni-zemnich-plynu>
- [33] http://www.mpoefekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/spalovani_skladacka_8129.pdf
- [34] <http://www.odpadoveforum.cz/OF2011/dokumenty/prispevky/055.pdf>

13. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č.1 Prostup tepla válcovou stěnou rotační pece

Příloha č.2 Prostup tepla válcovou stěnou dohořivací komory

Výkres Spalovací zařízení

Kompaktní disk CD

Soubory: Bakalářská práce – Návrh rotační pece pro spalovnu radioaktivních odpadů

 Prostup tepla válcovou stěnou rotační pece

 Prostup tepla válcovou stěnou dohořivací komory

 Výkres – Spalovací zařízení

Příloha č.1

Prostup tepla válcovou stěnou rotační pece

Zadání

Součinitel přestupu tepla stěnou	α_1 [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	73,9		
Součinitel přestupu tepla vzduchem	α_2 [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	11,6		
Teplota okolí	t_1 [$^{\circ}C$]	20		
Teplota ve spalovací peci	t_2 [$^{\circ}C$]	1000		
Průměry stěn	d_{sk} [m]	1,2		
	d_1 [m]	1,5	λ_1 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	2,1
	d_2 [m]	1,9	λ_2 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	0,283
	d_3 [m]	2	λ_3 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	47,2

Součinitel přestupu tepla [6]

Součinitel přestupu tepla konvekcí $\alpha_K = 4,03 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Součinitel přestupu tepla sáláním $\alpha_S = 69,85 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Celkový součinitel $\alpha_1 = 73,9 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Součinitel pro vzduch $\alpha_2 = 11,6 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

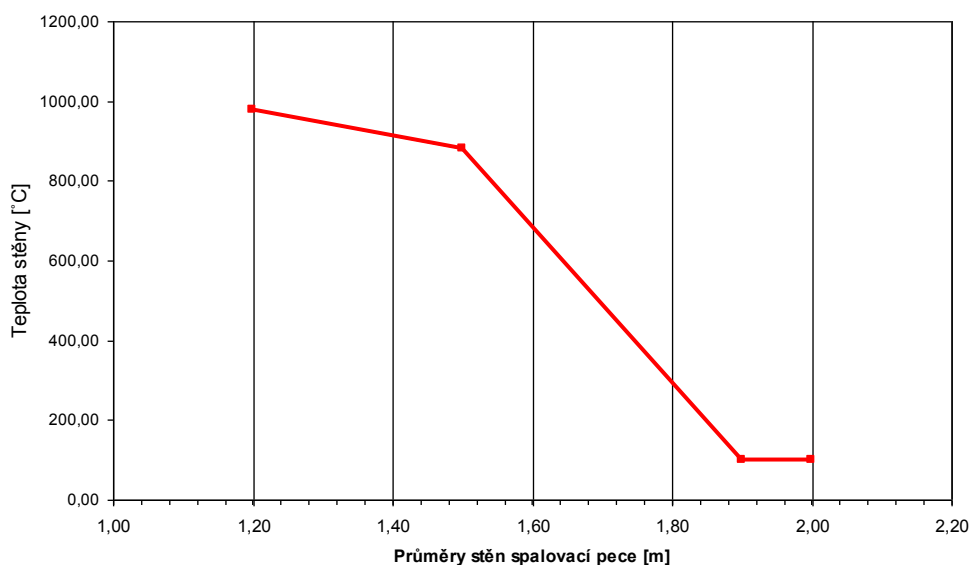
Výsledek

Součinitel prostupu tepla	k [-]	5,98
Hustota tepelného toku	q [$W \cdot m^{-2}$]	5856,5
Teploty stěn	t_{st1} [$^{\circ}C$]	979
	t_{st2} [$^{\circ}C$]	880
	t_{st3} [$^{\circ}C$]	101,4
	t_{st4} [$^{\circ}C$]	100,4

Tepelné ztráty do okolí z povrchu pláště rotační pece

$$q_z = \alpha \cdot (t_{st4} - t_1) = 11,6 \cdot (100,3 - 20) = 931,5 W \cdot m^{-1}$$

Teploty stěn spalovací pece [$^{\circ}C$]



Příloha č.2

Prostup tepla válcovou stěnou dohořivací komory

Zadání

Součinitel přestupu tepla stěnou	α_1 [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	91		
Součinitel přestupu tepla vzduchem	α_2 [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]	11,6		
Teplota okolí	t_1 [$^{\circ}C$]	20		
Teplota ve spalovací peci	t_2 [$^{\circ}C$]	1200		
Průměry stěn	d_{sk} [m]	1,5		
	d_1 [m]	1,8	λ_1 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	2,1
	d_2 [m]	2,2	λ_2 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	1,1
	d_3 [m]	2,3	λ_3 [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]	47,2

Součinitel přestupu tepla [6]

Součinitel přestupu tepla konvekcí $\alpha_K = 3,41 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Součinitel přestupu tepla sáláním $\alpha_S = 87,56 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Celkový součinitel $\alpha_1 = 91 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Součinitel pro vzduch $\alpha_2 = 11,6 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$

Výsledek

Součinitel prostupu tepla	k [-]	6,76
Hustota tepelného toku	q [$W \cdot m^{-2}$]	7973,3
Teploty stěn	t_{st1} [$^{\circ}C$]	1181,3
	t_{st2} [$^{\circ}C$]	1016,2
	t_{st3} [$^{\circ}C$]	116,3
	t_{st4} [$^{\circ}C$]	115,2

Tepelné ztráty do okolí z povrchu pláště dohořivací komory

$$q_z = \alpha \cdot (t_{st4} - t_1) = 11,6 \cdot (115,2 - 20) = 1104,31 W \cdot m^{-1}$$

Teploty stěn dohořivací komory [$^{\circ}C$]

