

# NÁVRH MATEMATICKÉHO MODELU PRO OPTIMALIZACI VYTVÁŘENÍ SMĚSÍ SPALITELNÝCH ODPADŮ PRO SPALOVNY

PETR BYCZANSKI<sup>a</sup> a KAREL OBROUČKA<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Ústav geoniky AV ČR, Studentská 1768, 708 33 Ostrava-Poruba, <sup>b</sup> Centrum environmentálních technologií, VŠB-TU Ostrava, 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava-Poruba  
byczanski@ugn.cas.cz, karel.obroucka@vsb.cz

Došlo 27.5.05, přepracováno 13.3.06, přijato 16.3.06.

Klíčová slova: odpady, spalování odpadů, energetické využití (odpadů), vytváření spalitelných směsí, spalovací pec, sklad odpadů

## Obsah

1. Úvod
2. Základní předpoklady
3. Spojitý výběr odpadů do dávky ke spálení
4. Diskrétní výběr odpadů do dávky ke spálení
5. Další společné aspekty
6. Závěr

## 1. Úvod

V posledních desetiletích je věnována značná pozornost odborníků možnostem využívání energetického obsahu spalitelných odpadů. Uvedený přístup je podporován i současnými legislativními opatřeními, která v odpadovém hospodářství upřednostňují dva základní postupy, a to jednak materiálové využití odpadů jako druhotné suroviny, jednak energetické využití spalitelných odpadních látek z průmyslu i komunální sféry.

K tomu, aby byly naplněny podmínky pro energetické využití stanovené platným zákonem o odpadech (zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech v platném znění<sup>1</sup>), je vyžadováno splnění dvou základních předpokladů. Vedle povinnosti prokázat využití tepla získaného (vzniklého) spalováním odpadu jde zejména o podmínku, aby po zapálení odpadu již nebylo při jeho následném spalování nutno přivádět podpůrné palivo.

S ohledem na rozmanitost různých odpadů, které je možno odstraňovat (zneškodňovat) jejich spalováním, je zřejmé, že pro zajištění výše uvedených podmínek jsou nezbytná určitá „organizační“ opatření. Ne každý spalitelný odpad má totiž dostatečnou minimální výhřevnost, kte-

rá by zabezpečila jeho samostatné spalování bez dalšího přívodu tepla zvenčí systému. Odpady se navíc vyznačují značnou nehomogenitou, vysokým obsahem vlhkosti a balastních látek a často i různých škodlivin, při jejichž spalování vznikají nebezpečné emise znečišťující ovzduší. Uvedené skutečnosti nepříznivě ovlivňují nejen průběh vlastního spalovacího procesu, ale i možnost účelného využití vzniklého tepla, a v neposlední řadě i spolehlivost a efektivitu funkce jednotlivých technologií čištění spalin<sup>2-7</sup>.

Jeví se proto nezbytné řízení ovlivňovat složení a výslednou výhřevnost jednotlivých dávek odpadů dodávaných do spalovací pece ke spálení a to takovým způsobem, aby se vlastnosti dílčí „dávky“ odpadů z hlediska svých významných parametrů měnily co nejméně, případně, aby se hodnoty těchto parametrů měnily pokud možno plynule. Touto optimalizací složení vsázky je možno zabezpečit nejen žádoucí průběh spalovacích procesů při nízké (optimálně nulové) spotřebě podpůrného a dodatečného paliva, ale rovněž optimální využití vzniklého odpadního tepla (např. konstantní výroba páry), a to při spolehlivé funkci čištění spalin, neboť jednotlivé stupně čištění mohou v tomto případě pracovat v určitém stálém režimu.

Řešení uvedeného problému však vyžaduje řízení složení dílčích vsázek (zavážených do spalovací pece obvykle v půlhodinových nebo hodinových intervalech) v reálném čase. V tomto případě je řešení možné pouze při použití počítače, s jehož pomocí může operátor na spalovně provést požadovaný výběr odpadů. Přitom musí být k dispozici databáze spalitelných odpadů, jejichž spalování a energetické využití se v konkrétní uvažované spalovně realizuje.

Cílem výzkumu popsání v tomto sdělení bylo vytvořit matematický model pro řízení vsádek kontinuálních spaloven. Nezbytný laboratorní výzkum základních termochemických vlastností spalitelných odpadů a zpracování výsledné databáze bylo realizováno v rámci řešení úkolu VaV/720/16/03 s názvem „Výzkum spalování odpadů“<sup>8</sup> (zadaného v rámci veřejné soutěže vyhlášené MŽP) a v rámci řešení projektu GA ČR ev. č. 106/01/1547 s názvem „Výzkum termochemických a fyzikálních vlastností odpadů s cílem optimalizace spalování a hledání alternativních metod“. Po vybavení pracoviště a zpracování podkladů pro databázi odpadů<sup>9,10</sup> byl navržen základní matematický model<sup>11</sup> řešící optimalizaci vytváření směsí spalitelných odpadů.

## 2. Základní předpoklady řešení

Principy procesu. Proces termického zpracování odpadů jejich řízenou oxidací (spalováním) může být realizován v různých konstrukčních typech spalovacích pecí na odpad<sup>6,7</sup> pracujících periodicky (přerušovaně) nebo kontinuálně (spojitě).

Kontinuálně pracující pece. Používají se pece roštové, rotační a jiné. Pracují po uvedení pece na provozní teplotu po dobu jedné nebo více pracovních směn, ale i po dobu několika dnů, týdnů či měsíců, nepřetržitě s plynulým

(quazikontinuálním) přívodem nových dávek odpadu i plynulým odvodem produktů (plynných produktů spalování i tuhých zbytků). Přitom doba pobytu dílčí dávky odpadu v reakční komoře, v níž spalování probíhá, je cca 2 hodiny. Čerstvá dávka odpadu je vsazována do pece vyhřáté na potřebnou teplotu, což zajistí rychlý průběh procesu.

*Periodicky pracující pece.* Používají se pece komorové, muflové apod. Dávka odpadů určená ke spálení je vsazena do studené pece najednou v množství, které odpovídá hmotnostní a tepelné kapacitě pece, a (po vyhřátí komory dodatečného spalování na předepsanou teplotu) je následně zapálen podpůrný hořák, jehož účelem je vyhřátí reakční komory pece včetně odpadu, v ní uloženého, na zápalnou teplotu; postupně dochází k růstu teploty a probíhají jednotlivé fáze spalování odpadu (odpaření vlhkosti, odplynění, zapálení plynné hořlaviny, zapálení odpadu ...). Proces končí prakticky úplným spálením odpadu uloženého do pece; následuje chlazení tuhých zbytků v peci, jejich odstranění a vyčištění pece. Pec je takto (po cca 10–12 hodinách od začátku procesu) připravena k nasazení další vsázky spalitelných odpadů.

*Zaměření matematického modelu.* Navržený matematický model je zaměřen na kontinuálně pracující spalovny, které v současnosti pro své nesporné výhody tvoří významnou část kapacit spalovacích pecí na odpad. Model by bylo možné použít s malými úpravami i na spalovny periodicky pracující a na výroby alternativního paliva.

U kontinuálně pracujících spaloven je pro jejich provozní funkci důležitá logistika zásobování spalovny odpady určenými ke spálení. Většina provozovaných spaloven průmyslového (nebezpečného) odpadu má vybudován mezisklad odpadů, jehož účelem je vyrovnaní nerovnoměrností vlastností přímých dodávek odpadu do spalovny. Tento mezisklad je obvykle realizován ve dvou základních verzích. Jednou možností je tzv. kontejnerový systém, založený na výběru celých obsahů skladovacích kontejnerů (např. v počtu 3 až 4 kontejnerů) do dílčích dávek odpadů ke spálení. Tento postup se používá obvykle u menších spaloven. Druhou možností pak je uskladnění odpadů ve velkoobjemových betonových zásobnících (bunkrech), například v počtu 4 až 10 zásobníků, v nichž jsou uskladněny různé spalitelné odpady. Výběr odpadů ke spálení spočívá v tomto případě v odběru určitého množství (určité hmotnosti) odpadu z několika vybraných zásobníků tak, aby byla dodržena celková požadovaná hmotnost jedné dílčí vsázky.

*Cíl vytvoření modelu.* Cílem je modelování procesu přípravy odpadních směsí a jeho následné využití pro zajištění co nejplynulejšího chodu spalovny, a to pro případ, kdy má spalovna svůj vlastní vyrovnávací sklad odpadů.

*Princip řešení.* Jádrem řešeného problému je vzájemné smíchávání jednotlivých druhů spalitelných odpadů tak, aby se výsledné parametry spalovacího procesu (výhřevnost, obsah síry, obsah dalších znečišťujících látek) měnily co nejplynuleji, resp. nevybočovaly z předem daných rozsahů. Při využití tepla je žádoucí, aby jeho pro-

dukce příliš nekolísala, resp. aby se měnila pouze pozvolna. Odstraňování škodlivin ze spalin vyžaduje použití jistých technologií<sup>6,12</sup>. Pro správnou funkci koncových technologií je výhodné, aby se vlastnosti odpadních proudů měnily jen málo nebo měnily plynule. Například, oproti situaci, kdy v jedné dávce je velký obsah síry (kyselých složek) a v další žádný, je výhodnější, když obě dávky budou mít jejich poloviční obsah. Proces „odstraňování kyselých složek“ bude ekonomičtější a účinnější, potřebné chemikálie budou lépe využity.

*Podmínky řešení.* Kdyby se odpady dávkovaly do pece přímo tak, jak jsou dováženy, nebylo by co řídit. Proto předpokládáme, že spalovna má jistý prostor pro „pozdržení“ některých odpadů. Toto nemusí být realizováno pouze tím, že spalovna má svůj velký sklad. Ekvivalentní možností je, že jednotliví producenti hlásí, co mají přichystáno, a dispečink spalovny zpětně oznamuje, kdy a jaké množství má být dovezeno.

Při vytvoření matematického modelu byl použit předpoklad, že existuje jistá konečná množina producentů odpadů a z toho plynoucí jistá konečná množina možných druhů spalitelných odpadů. Tyto odpady byly formálně očíslovány. Index odpadu je označen symbolem  $j$ .

Příklad konkrétní situace:

Index odpadu, $j$	Odpad
1	zaolejované textilie
2	plastové obaly
3	obalový papír

Dále byl použit předpoklad, že i množina vlastností důležitých z hlediska spalování je konečná. Tyto sledované vlastnosti jsou označeny názvem veličiny a indexovány symbolem  $i$ .

Příklad konkrétní situace:

Index veličiny, $i$	Veličina
1	výhřevnost odpadu, $\text{kJ kg}^{-1}$
2	obsah síry v odpadu, $\text{hm.}\%$
3	obsah chloru v odpadu, $\text{hm.}\%$

Označování charakteristik odpadu: Předpokládá se, že hodnoty veličin jsou vztaženy na jednotku hmotnosti odpadu. Pro označování potřebných údajů byla zavedena konvence

veličina údaj odpad

Index nalevo udává sledovanou veličinu (vlastnost), index napravo udává druh odpadu. Tímto pozičním rozlišením se zabrání možným nedorozuměním a odstraní se nutnost neustálého opakování významu indexů v jednotlivých vzorcích.

Nejdůležitějším výchozím údajem je zastoupení „veličiny  $i$ “ v jednotkovém množství „odpadu  $j$ “. Označíme si jej  $i_k$ . Např.  $1_{k_1}$  je výhřevnost odpadu „zaolejované textilie“.

V ideálním případě jsou hodnoty přesné a známé hod-

noty. V praxi je znalost omezena pouze na nějaké pravděpodobnostní rozložení hodnot a je zatížena nejistotou. Např. může být známa střední hodnota a rozptyl nebo rozsah intervalu výskytu. Pokud není konkrétní hodnota známa, je možno využít údajů z vytvořené databáze odpadů<sup>8</sup>.

Další formalizace a upřesňování popisu chodu spalovny již značně závisí na uspořádání skladu odpadů a způsobu výběru odpadů do dávky do spalovací pece.

### 3. Spojitý výběr odpadů do dávky ke spálení

Asi nejjednodušší případ nastává, když uspořádání skladu spalovny lze znázornit dle schématu uvedeného na obr. 1.

*Systém dávkování.* Jednotlivé druhy odpadů jsou uskladněny v oddělených boxech. Dávka odpadů ke spálení je tvořena odběry určitých množství (hmotností) odpadů z jednotlivých skladovacích boxů. Aktuální hmotnost „odpadu j“ označíme  $M_j$ . Předpokládejme, že hmotnost  $q$  dávky ke spálení je předem dána např. konstrukcí a tepelným režimem spalovací pece.

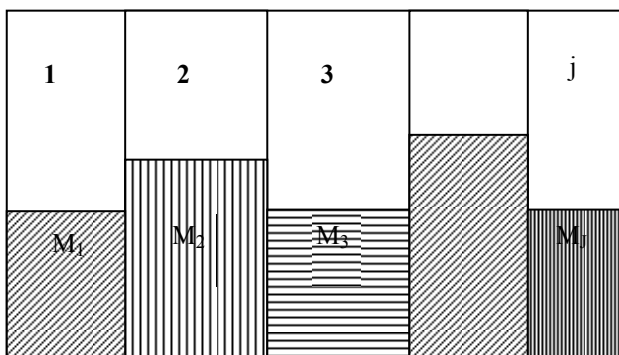
Hledané hmotnosti jednotlivých druhů odpadů v dávce ke spálení ( $m_j$ ) musí splňovat omezení plynoucí z podmínky, že je možné vybírat pouze z toho, co je k dispozici na skladě, a že je nutné dodržet celkovou hmotnost dávky ke spálení.

$$0 \leq m_j \leq M_j \quad (1)$$

$$\sum_j m_j = q \quad (2)$$

Cílem řízení je zajistit co nejplynulejší chod spalovny (spalovací pece).

Označme si hodnoty důležitých veličin v předchozí dávce symbolem  $i^h$ . Chod spalovací pece by byl nejplynulejší, kdyby byla pro všechny důležité veličiny splněna



Obr. 1. Uspořádání skladu spalovny se skladovacími boxy

podmínka, že je jejich hodnota v dané vsádce rovna hodnotě pro vsádku předchozí:

$$i^h = \sum_j i^k_j \cdot m_j \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots$$

I přes průběžné doplňování skladu novým odpadem by zřejmě časem (po namíchání mnoha dávek) došlo k tomu, že by tyto rovnosti nemohly být splněny. Některý druh odpadu by se hromadil, jiného druhu by se nedostávalo.

Proto je nutné požadavek na neměnnost některých vstupních parametrů zmírnit. Mírou proměnnosti vstupní veličiny je rozdíl mezi její hodnotou v předchozí vsádce a v nové vsádce:

$$i^h - \sum_j i^k_j \cdot m_j$$

Protože malé rozdíly mají na režim spalování menší vliv než rozdíly velké, byl k hodnocení změn vstupních veličin použit kvadrát rozdílu:

$$\left[ i^h - \sum_j i^k_j \cdot m_j \right]^2$$

Za celkovou míru neplynulosti chodu spalovací pece byl použit vážený součet čtverců odchylek:

$$\sum_i i^w \cdot \left[ i^h - \sum_j i^k_j \cdot m_j \right]^2$$

Váhy jednotlivých veličin  $i^w$  jsou voleny tak, aby respektovaly dvojí hledisko:

- relativní důležitosti jednotlivých veličin,
- převedení hodnot na společné měřítko.

Požadavek co největší plynulosti chodu spalovny se potom vyjádří jako minimalizace celkové míry neplynulosti režimu:

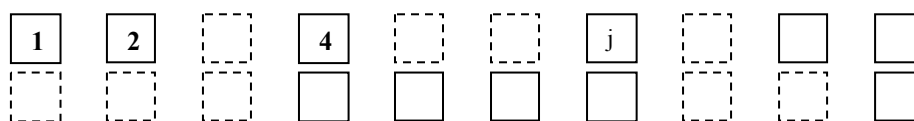
$$\sum_i i^w \cdot \left[ i^h - \sum_j i^k_j \cdot m_j \right]^2 \stackrel{!}{=} \text{minimální} \quad (3)$$

Problém nalezení hodnot  $m_j$  splňujících (1), (2), (3) je úlohou kvadratického programování<sup>13, 14</sup>.

### 4. Diskrétní výběr odpadů do dávky ke spálení

Radikálně odlišné uspořádání skladu spalovny lze znázornit obr. 2. Odpady jsou v tomto případě umístěny v očíslovaných kontejnerech, prázdná místa ve skladu resp. prázdné kontejnery jsou vyznačeny tečkovaně. Do dávky ke spálení vstupují celé obsahy jednotlivých kontejnerů. Namíchání dávky ke spálení je ekvivalentní výběru jisté podmnožiny ze všech aktuálně přítomných kontejnerů.

Vložení obsahu kontejneru  $j$  do vsádky označme po-



Obr. 2. Uspořádání skladu spalovny se skladovacími kontejnery

mocí hodnoty veličiny  $p_j$

$p_j = 1$ ... kontejner vybrán

$p_j = 0$ ... kontejner nevybrán.

Namíchání dávky odpadní směsi vede na kombinatorickou úlohu:

$$p_j \in \{0,1\} \quad (4)$$

$$q_{od} \leq \sum_j \mu_j \cdot p_j \leq q_{do} \quad (5)$$

$$\sum_i w \cdot \left[ i \cdot h - \sum_j \kappa_j \cdot \mu_j \cdot p_j \right]^2 = \text{minimální} \quad (6)$$

$\mu_j$  značí hmotnost odpadu v kontejneru.

## 5. Další možnosti řešení

První otázkou po formalizaci procesu namíchání dávky je, zdali řešení vycházející ze splnění vztahů (1)–(3) nebo (4)–(6) je jedinou možností řešení. Dodržení platnosti vztahů (1) a (2) resp. (4) a (5) je neoddiskutovatelné. Místo vztahu (3) resp. (6) je další realistickou možností, že pro některé veličiny ze společného kritéria je požadováno dodržení nějakých omezení, např.

$$\sum_{i \neq 2} w \cdot \left[ i \cdot h - \sum_j \kappa_j \cdot m_j \right]^2 = \text{minimální}$$

$$\sum_j \kappa_j \cdot m_j < \text{mez}$$

Příkladem je požadavek, aby obsah síry nepřekročil jistou mez a ostatní veličiny byly ponechány ve společném minimalizovaném kritériu. Předpokládejme, že jsme schopni obě uvedené úlohy řešit. Vystává otázka, zda bude řízení spalovny podle takto navrženého modelu užitečné. Je pravděpodobné, že se na počátku zavedení tohoto omezení projeví příznivě. Průběhy sledovaných veličin budou určitě méně kolísat oproti náhodně připravovaným dávkám. Po delší době se ale zřejmě projeví to, že některé druhy odpadů budou zůstávat neúměrně dlouho na skladě.

Pro optimalizaci režimu je proto nutno vzít v úvahu

i stáří odpadu. Do modelu je nutno přidat ještě nějakou urgenci, která bude způsobovat růst pravděpodobnosti výběru do dávky s rostoucím stářím odpadu.

## 6. Závěr

Procesy spalování odpadů jsou z procesního hlediska doprovázeny značným stupněm nepřesnosti. Důvodem je především značná nehomogenita vlastností spalovaného odpadu, ať již z pohledu základních charakteristik ovlivňujících chemickou stránku procesu (obsah hořlaviny, obsah škodlivin, výhřevnost, zápalná teplota), tak i z hlediska různé zrnitosti (kusovosti) spalovaných odpadních látek a různé míry vlhkosti. Dávkování směsi je diskrétní, dané počtem kontejnerů nebo drapáků sázecího jeřábu, obsahy škodlivin jsou dosti často pouze odhadnuty.

I přesto byl učiněn pokus o modelování tvorby vsázky do spalovacího procesu, jehož cílem je zvýšení plynulosti tepelné práce spalovny. Byl navržen přibližný postup zmenšení míry neplynulosti a zajištění požadavku, aby některý druh odpadu nezůstával neúměrně dlouho na skladě.

Navržené modelové řešení tvorby vsázky pro spalovací pec na odpad bylo využito při řešení úkolu VaV/720/16/03 Výzkum spalování odpadů<sup>8</sup>. V rámci diplomové práce<sup>15</sup> byly vytvořeny programy realizující numerické řešení vztahů (1)–(3) a (4)–(6) se zahrnutím stáří odpadu. Tyto byly pro oba systémy ověřeny v rámci měřených experimentů na provozovaných spalovnách nebezpečných průmyslových odpadů<sup>8,16,17</sup>.

*Tato práce vznikla v rámci řešení a za finanční podpory projektu ev.č. VaV/720/16/03 „Výzkum spalování odpadů“, vyhlášeného ve veřejné soutěži MZP.*

## Seznam symbolů

$\kappa_j$	hodnota veličiny $i$ v jednotkovém množství odpadu
$j$	
$M_j$	hmotnost odpadu $j$ ve skladovacím boxu
$m_j$	hmotnost odpadu $j$ v dávce ke spálení
$q$	hmotnost dávky odpadu ke spálení
$h$	hodnota veličiny $i$ v předchozí dávce
$w$	váha veličiny $i$
$\mu_j$	hmotnost odpadu v kontejneru $j$

$p_j$	přítomnost kontejneru $j$ v dávce odpadu ke spálení
$q_{od}$	minimální hmotnost dávky odpadu ke spálení
$q_{do}$	maximální hmotnost dávky odpadu ke spálení
$j$	index odpadu
$i$	index veličiny

## LITERATURA

1. Zákon č. 185/2001 Sb. o odpadech (v platném znění). Sbírka zákonů ČR, částka 71, ročník 2001.
2. Suess M. J. (ed.): Solid Waste Management. *Selected Topics*. World Health Organization, Copenhagen 1983.
3. Bilitewski B., Hardtle G., Marek K.: *Abfallwirtschaft*. Springer Verlag, Berlin 1991.
4. Brunner C. D.: *Incineration Systems. Selection and Design*. Van Nostrand Reinhold, New York 1984.
5. Rybín M.: *Spalování paliv a hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů*. SNTL, Praha 1985.
6. Obroučka K. a kol.: Termické zneškodňování odpadů. Zpráva o řešení projektu Tempus SJEP TTRIMM 07689, Modul: Waste Management. VŠB-TU Ostrava 1997.
7. ČSN 06 3090. *Zařízení pro termické zneškodňování odpadů*. ČNI, Praha 1997.
8. Obroučka K.: Závěrečná zpráva o řešení veřejné zakázky ev.č. VaV/720/16/03 „Výzkum spalování odpadů“. VŠB-TU Ostrava, Centrum environmentálních technologií, listopad 2005.
9. Obroučka K., Fiedor J., Dědicová J., Stročková M.: Termochemické charakteristiky spalitelných odpadů. Zpráva o řešení projektu GA ČR č. 106/01/1547, VŠB-TU Ostrava, prosinec 2003.
10. Obroučka K., Fiedor J., Dědicová J., Stročková M.: *Acta Metallurgica Slovaca*, č. 4, 2005.
11. Byczanski P., Obroučka K.: Optimalizace vytváření směsí spalitelných odpadů. Zpráva o řešení projektu GA ČR 106/01/1547, VŠB-TU Ostrava, březen 2003.
12. Stern A. C.: *Air Pollution*. Academic Press, New York 1968.
13. Havrda J.: *Matematické programování*. SNTL, Praha 1972.
14. Mañas M.: *Optimalizační metody*. SNTL, Praha 1979.
15. Ferkovič J.: *Diplomová práce*. VŠB-TU Ostrava, 2005.
16. Obroučka K., Ferkovič J.: Optimalizace tvorby vsázek pro spalovny odpadů. *Proceedings of 9<sup>th</sup> International Scientific Conference „Energy Transformations in Industry“*, High Tatras, Slovakia, June 2005.
17. Obroučka K., Ferkovič J.: Časopis Odpadové fórum č. 12, s. 27–30 (2005).

**P. Byczanski<sup>a</sup> and K. Obroučka<sup>b</sup>** (<sup>a</sup>*Institute of Geonics, Academy of Sciences of the Czech Republic, Ostrava*, <sup>b</sup>*Centre of Environmental Technologies, VSB – Technical University of Ostrava*): **Mathematical Model for Burning Waste Mixtures in Incinerator Optimization**

Due to material and size inhomogeneity as well as to the contents of moisture, ballast and materials producing dangerous emissions in combustion, it is necessary to control composition and the caloric value of waste batches put to combustion furnace. The batches should differ in their important parameters only little and their changes should be slow. The optimization of charge composition guarantees the desirable course of combustion, low fuel consumption, optimum heat utilization and reliable functioning of flue gas cleaning. The paper presents a mathematical model algorithm for incinerator operation. A prerequisite for its application is a database of characteristics of combustible wastes.