

June 30, 2001

Dobór systemu oczyszczania gazów odlotowych ze spalania odpadów niebezpiecznych

Robert Oleniacz

Robert Oleniacz*

Dobór systemu oczyszczania gazów odlotowych ze spalania odpadów niebezpiecznych**

1. Wstęp

Stojąc na progu zmian w polskich przepisach prawnych regulujących gospodarkę odpadami niebezpiecznymi, które powinny nas przybliżyć do prawodawstwa unijnego, należy zdawać sobie sprawę, że procesy termicznego przekształcania tych odpadów będą musiały być prowadzone z zachowaniem standardów zachodnioeuropejskich. Dotyczy to m.in. dopuszczalnych ilości substancji, jakie będą mogły być wprowadzane do powietrza atmosferycznego z procesów tego typu. Normy emisji wynikające z Dyrektywy Rady Unii Europejskiej 94/67/EC z 16.12.1994 r. w sprawie spalania odpadów niebezpiecznych [2] są na tyle ostre, że obiekty spełniające te normy nie powinny powodować istotnego pogorszenia jakości powietrza w swoim otoczeniu. Wyjątek mogą stanowić instalacje o wyjątkowo źle dobranych wymiarach geometrycznych emitora i niefortunnej jego lokalizacji, gdyż bardzo ważną rolę odgrywają tutaj także: miejsce i sposób wprowadzania gazów odlotowych do powietrza, jako czynniki mające wpływ na rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń w powietrzu (lokalne warunki topograficzne i meteorologiczne), oraz położenie emitora względem zabudowy mieszkalnej czy obszarów chronionych. Regułą powinno być optymalizowanie wysokości punktu emisji i parametrów wylotowych emitowanych gazów pod kątem zminimalizowania uciążliwości dla otoczenia tego typu instalacji. Koszty przeprowadzenia takiej optymalizacji i realizacji wynikających z niej zaleceń nie są z reguły duże w stosunku do całości kosztów inwestycyjnych.

Przegląd metod oczyszczania gazów odlotowych ze spalania odpadów niebezpiecznych przeprowadzono w pracy [9]. W niniejszym artykule przedstawiono

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska

** Praca została wykonana w ramach badań własnych AGH nr 10.10.150.490

przykładowe systemy oczyszczania gazów odlotowych oraz przeanalizowano, dla jakich poziomów stężeń wybranych substancji występujących na wlocie do takich systemów możliwe jest jeszcze ich stosowanie tak, aby nie zostały przekroczone dopuszczalne stężenia w gazach emitowanych do powietrza obowiązujące w krajach Unii Europejskiej (tab. 1).

Tabela 1. Dopuszczalne ilości substancji emitowanych do powietrza w gazach odlotowych z procesów spalania odpadów niebezpiecznych obowiązujące w Unii Europejskiej (wg Dyrektywy 94/67/EC) [2]

Nazwa substancji	Dopuszczalne stężenia w gazach emitowanych do powietrza [mg/m^3] ¹⁾					
	wartości średnie półgodzinne		wartości średnie dobowe	wszystkie wartości średnie mierzone min 1/2 – max 8 godz.		wszystkie wartości średnie mierzone min 6 – max 8 godz.
	(a)	(b)		(c)	(d)	
Pył całkowity	30	10	10	—	—	—
Lotne związki organiczne w przeliczeniu na całkowity węgiel organiczny (C_{org})	20	10	10	—	—	—
HCl	60	10	10	—	—	—
HF	4	2	1	—	—	—
SO ₂	200	50	50	—	—	—
CO ²⁾	—	—	50	—	—	—
Cd i Tl – ogółem	—	—	—	0,1	0,05	—
Hg	—	—	—	0,1	0,05	—
Inne metale ogółem (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V, Sn)	—	—	—	1,0	0,5	—
PCDDs/PCDFs [ngTEQ/m^3]	—	—	—	—	—	0,1

¹⁾ w gazie suchym w warunkach termicznych: 273 K i 101,3 kPa w przeliczeniu na 11% tlenu;

²⁾ stężenie CO nie może przekroczyć $150 \text{ mg}/\text{m}^3$ w co najmniej 95% wszystkich pomiarów określonych jako wartości średnie 10-minutowe lub $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ w przypadku wszystkich pomiarów określonych jako wartości średnie 30-minutowe:

- (a) – podane wartości bezwzględnie nie mogą być przekroczone,
- (b) – podane wartości muszą być dotzymane dla co najmniej 97% pomiarów 30-minutowych w ciągu roku,
- (c) – instalacje istniejące,
- (d) – instalacje nowe.

Systemy oczyszczania gazów odlotowych stanowią bardzo ważny element całej instalacji do spalania odpadów i często decydują o tym, jakie odpady mogą być w niej unieszkodliwiane z zachowaniem jeszcze akceptowalnego poziomu stężeń

zanieczyszczeń w gazach emitowanych do powietrza. Chodzi tutaj m.in. o możliwość usunięcia ze spalin takich substancji, jak np.: HCl, HF, SO₂ czy Hg, których ilość w gazach surowych jest wprost proporcjonalna do zawartości w odpadach chloru, fluoru, siarki czy rtęci. Także zawartość części mineralnych w odpadach nie jest obojętna dla ilości popiołu unoszonego z procesu spalania wraz ze spalinami, choć tutaj równie istotną rolę odgrywa sposób prowadzenia tego procesu, w tym rodzaj zastosowanego pieca (reaktora). Wymaga to stosowania odpowiednich urządzeń odpylających spaliny. Ich skuteczność działania musi być szczególnie duża, gdy w danej instalacji mają być spalane odpady o wysokiej zawartości metali ciężkich [5, 6].

2. Przykładowe systemy oczyszczania gazów odlotowych i skuteczności ich działania

W oparciu o głęboką analizę metod stosowanych do oczyszczania gazów odlotowych ze spalania odpadów niebezpiecznych przedstawioną w pracy [9] oraz przeprowadzone badania [7, 8] można zaproponować wiele różnych sposobów konfiguracji całego systemu i oszacować całkowitą skuteczność usuwania ze spalin wybranych zanieczyszczeń. W ten sposób możliwe jest także określenie granicznych wartości stężeń poszczególnych substancji w gazach surowych (nie oczyszczonych), przy których dany system pozwoli jeszcze na dotrzymanie żądanych (dopuszczalnych) poziomów stężeń w gazach emitowanych do powietrza.

Spośród rozwiązań spotykanych w praktyce przeanalizowane zostaną następujące systemy oczyszczania gazów odlotowych różniące się skutecznością działania:

- system 1: dysze schładzające + płuczka pianowo-absorpcyjna (absorpcja w roztworze NaOH);
- system 2: płuczka wodna z niskociśnieniową zwężką Venturiego + płuczka z wypełnieniem (absorpcja w roztworze NaOH);
- system 3: zraszacz spalin + płuczka wodna z wypełnieniem + zespół zwężek Venturiego (NaOH);
- system 4: zraszacz spalin + ciśnieniowy skrubler Venturiego + płuczka z wypełnieniem (NaOH);
- system 5: podawanie sorbentu wapniowo-węglowego + filtr ceramiczny;
- system 6: elektrofiltr + zwężka Venturiego + płuczka z wypełnieniem (NaOH);
- system 7: elektrofiltr + absorber HCl (H₂O lub roztwór HCl) + absorber SO₂ (roztwór Ca(OH)₂);
- system 8: bateria cyklonów + nawilżacz rozpyłowy + podawanie suchego sorbentu wapniowego + filtr tkaninowy;

- system 9: zraszacz spalin + płuczka z wypełnieniem (roztwór NaOH) + podawanie węgla aktywnego + filtr tkaninowy;
- system 10: bateria cyklonów + suszarka rozpyłowa (rozpylanie zawiesiny kamienia wapiennego) + podawanie węgla aktywnego + filtr tkaninowy;
- system 11: wysokosprawny elektrofiltr + absorber HCl/HF (H₂O) + absorber SO₂ (roztwór Ca(OH)₂) + filtr węglowy lub reaktor przepływowy z węglem aktywnym;
- system 12: wysokosprawny elektrofiltr + suszarka rozpyłowa (podawanie zawiesiny kamienia wapiennego i węgla aktywnego) + filtr tkaninowy + absorber HCl/HF + absorber SO₂ + reaktor przepływowy z węglem aktywnym lub reaktor do katalitycznej redukcji NO_x i odchlorowania PCDD/Fs.

Nie są to oczywiście wszystkie możliwe systemy stosowane do oczyszczania gazów odlotowych ze spalania odpadów niebezpiecznych (inne przykłady zamieszczono m.in. w pracy [9]), ale odzwierciedlają większość spośród stosowanych w praktyce konfiguracji metod i urządzeń. Najbardziej bogate rozwiązania (analogiczne do systemu 11 lub 12), wzbogacone ewentualnie o dodatkowe, specjalne metody usuwania ze spalin ekstremalnie dużych ładunków par rtęci i innych metali czy HCl, muszą być stosowane w przypadku tych instalacji, które mają mieć jak najmniejsze ograniczenia co do rodzaju kierowanych do nich odpadów niebezpiecznych. W praktyce dotyczą one zatem przede wszystkim spalarni działających komercyjnie, przyjmujących większość odpadów niebezpiecznych nadających się do spalania.

Średnie skuteczności usuwania z gazów odlotowych pyłu, metali ciężkich, SO₂, HCl i HF dla tych systemów można przyjąć na poziomie przedstawionym w tabeli 2.

Tabela 2. Średnia skuteczność usuwania wybranych substancji oszacowana dla poszczególnych systemów oczyszczania gazów odlotowych ze spalania odpadów niebezpiecznych

Rodzaj substancji	Średnia skuteczność oczyszczania gazów odlotowych przez system [%]											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pył	86	90	95	98	99	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	99,8	99,9
Cd, Tl	70	80	80	90	95	95	95	97	97	97	98	99
Hg	50	60	70	60	70	60	60	50	80	80	85	95
Pozostałe metale ciężkie	90	92	95	98	99	99,5	99,5	99,5	99,5	99,5	99,8	99,9
SO ₂	75	85	95	85	80	85	98	75	85	90	99	99,5
HCl	90	95	98	95	90	95	99	90	95	95	99,5	99,8
HF	70	80	90	80	85	80	98	85	80	90	99	99,5

3. Analiza przydatności omawianych systemów do oczyszczania gazów odlotowych z określonych ładunków zanieczyszczeń

W spalinach surowych z procesu spalania danego rodzaju odpadów najczęściej możliwe jest przybliżone oszacowanie stężeń większości substancji (lub grup substancji), dla których w tabeli 2 określone zostały skuteczności ich usuwania ze spalin. Może to się odbyć m.in. w oparciu o znajomość właściwości tych substancji, składu odpadów i warunków prowadzenia procesu ich spalania. Biorąc powyższe pod uwagę, wstępny dobór instalacji oczyszczania gazów odlotowych z tego procesu można przeprowadzić w bardziej optymalny sposób.

W tabelach 3 i 4 zamieszczono przykładowe wartości graniczne stężeń analizowanych substancji w gazach nie oczyszczonych i przyporządkowano im te spośród rozpatrywanych systemów (znak +), które gwarantują usunięcie ich z tych gazów do poziomu nie przekraczającego wartości dopuszczalnych obowiązujących w krajach Unii Europejskiej (zgodnie z Dyrektywą 94/67/EC) dla stężeń średnich dobowych, a w przypadku metali ciężkich – dla wszystkich stężeń średnich zmierzonych w okresie od 30 minut do 8 godzin (instalacje nowe). Za podstawę tego przyporządkowania przyjęto zatem spełnienie warunku podstawowego

$$S_e \leq S_d \quad (1)$$

gdzie: S_e — stężenie danej substancji (grupy substancji) w suchym gazie emitowanym do powietrza (po oczyszczeniu) w warunkach:
 $T = 273 \text{ K}$, $p = 101,3 \text{ kPa}$, 11% tlenu;

S_d — stężenie dopuszczalne dla tej substancji (grupy substancji) w ww. warunkach.

Wartość S_e pozostaje natomiast w następującej zależności ze stężeniem danej substancji (grupy substancji) w suchym gazie surowym S_u (w przeliczeniu na te same warunki), tj. przed oczyszczeniem (stężenia S_u odpowiadają najczęściej stężeniom substancji unoszonym z danego procesu)

$$S_e = S_u \left(1 - \frac{\eta}{100} \right) \quad (2)$$

gdzie η — całkowita skuteczność usuwania danej substancji (grupy substancji) z gazu surowego w zastosowanym systemie oczyszczania gazów odlotowych, w %.

W tabelach 3 i 4 wyróżnione zostały pozycje dotyczące skrajnych wartości stężeń w gazach surowych, przy których warunek (1) możliwy jest jeszcze do spełnienia przez poszczególne systemy (wariant optymalny).

Tabela 3. Zalecane systemy oczyszczania gazów odlotowych ze spalania odpadów w zależności od stężeń granicznych pyłu i metali ciężkich w spalinach surowych

Przedział	Stężenie graniczne substancji [mg/m ³] ¹⁾	Zalecany system oczyszczania gazów odlotowych ²⁾											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Pył ogółem													
I	70	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
II	100	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
III	200	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
IV	500	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V	1000	—	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+
VI	2000	—	—	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+
VII	5000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+
VIII	10000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+
Kadm i tal (łącznie):													
I	0,16	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
II	0,25	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
III	0,5	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
IV	1,0	—	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+
V	1,6	—	—	—	—	—	—	—	+	+	+	+	+
VI	2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+
VII	5,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+
Rtęć:													
I	0,10	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
II	0,13	—	+	+	+	+	+	+	—	+	+	+	+
III	0,17	—	—	+	—	+	—	—	—	+	+	+	+
IV	0,25	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+	+	+
V	0,33	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+
VI	1,00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+
Pozostałe metale ciężkie (Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V i Sn – łącznie):													
I	5	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
II	6	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
III	10	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
IV	25	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+
V	50	—	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+
VI	100	—	—	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+
VII	250	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+
VIII	500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+

¹⁾ w suchym gazie surowym (przed oczyszczeniem) w warunkach: $T = 273 \text{ K}$, $p = 101,3 \text{ kPa}$, 11% tlenu,

²⁾ charakterystykę systemów przedstawiono w rozdziale 2.

Tabela 4. Zalecane systemy oczyszczania gazów odlotowych ze spalania odpadów w zależności od stężeń granicznych SO₂, HCl i HF w spalinach surowych

Przedział	Stężenie graniczne substancji [mg/m ³] ¹⁾	Zalecany system oczyszczania gazów odlotowych ²⁾											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Dwutlenek siarki:												
I	200	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
II	250	—	+	+	+	+	+	+	—	+	+	+	+
III	330	—	+	+	+	—	+	+	—	+	+	+	+
IV	500	—	—	+	—	—	—	+	—	—	+	+	+
V	1000	—	—	+	—	—	—	+	—	—	—	+	+
VI	2500	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—	+	+
VII	5000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+
VIII	10000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+
Chlorowodór:													
I	100	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
II	200	—	+	+	+	—	+	+	—	+	+	+	+
III	500	—	—	+	—	—	—	+	—	—	—	+	+
IV	1000	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—	+	+
V	2000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+
VI	5000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+
Fluorowodór:													
I	3,3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
II	5,0	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
III	6,7	—	—	+	—	+	—	+	+	—	+	+	+
IV	10	—	—	+	—	—	—	+	—	—	+	+	+
V	50	—	—	—	—	—	—	+	—	—	—	+	+
VI	100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+	+
VII	200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	+

¹⁾ w suchym gazie surowym (przed oczyszczeniem) w warunkach: $T = 273 \text{ K}$, $p = 101,3 \text{ kPa}$, 11% tlenu,

²⁾ charakterystykę systemów przedstawiono w rozdziale 2.

W zestawieniu nie ujęto takich substancji, jak np. CO czy związki organiczne, gdyż w większości przypadków istnieją techniczne możliwości takiego prowadzenia procesu spalania odpadów niebezpiecznych (wliczając w to systemy dopalania spalin), żeby ilość tych substancji w unoszonych gazach nie przekraczała odpowiednich wartości dopuszczalnych. Należy zresztą dążyć do uzyskania jak najwyższej sprawności spalania, co wiąże się ze zmniejszeniem ilości powstających produktów niezupełnego spalania. Pominięto także PCDD/Fs, których powstawanie

jest w małym stopniu przewidywalne, przez co niejako z konieczności często stosuje się bardzo skuteczne metody usuwania ich ze spalin lub zapobiegania ich powstawaniu (w wyniku np. syntezy *de novo*). Uwzględniając fakt, że zawartość PCDD/Fs w spalinach surowych unoszonych z procesów spalania odpadów zawierających chlor wynosi zwykle od kilku do kilkudziesięciu ngTEQ/m^3 [1, 3, 4, 10], redukcja ich stężeń do poziomu $0,1 \text{ ngTEQ/m}^3$ możliwa jest w przypadku systemów 5–12, przy czym w przypadku systemów 6–9 być może konieczne byłoby zastosowanie dodatkowego filtra z węgla aktywnego. Przyczyni się to także do zwiększenia skuteczności zatrzymywania innych związków organicznych, rtęci i pozostałych metali ciężkich, a częściowo także SO_2 , HCl i HF .

Należy tutaj zaznaczyć, że bardziej preferowane od usuwania niepożądanych substancji z gazów odlotowych powinno być zapobieganie ich powstawaniu w procesie termicznym lub późniejszemu odtwarzaniu się. Z punktu widzenia ochrony środowiska korzystniejsze jest też trwałe przekształcenie danej substancji do formy nieszkodliwej (nietoksycznej) niż przeniesienie jej tylko do innej fazy (postaci), w której ta substancja nadal się znajduje i wymaga specjalnego traktowania lub dalszej obróbki przed wprowadzeniem do środowiska. Szczególnie godne polecenia są układy bezściekowe i małoodpadowe, oparte na suchych lub pół-suchych systemach oczyszczania gazów odlotowych lub stosowaniu pełnego recyklingu strumieni zużytych cieczy absorpcyjnych (z płuczek) poprzez ich odparowanie, np. w suszarce rozpyłowej.

Przedstawione w tabelach 3 i 4 zalecane systemy oczyszczania gazów odlotowych dla poszczególnych zakresów stężeń wybranych substancji w spalinach surowych należy zatem traktować tylko jako przykładowe rozwiązania pozwalające na osiągnięcie założonego celu (redukcja stężeń do poziomu dopuszczalnego), a nie jako rozwiązania optymalne pod każdym względem. W przypadku występowania jeszcze wyższych wartości stężeń poszczególnych substancji w spalinach surowych niż zostało to uwzględnione w tabelach 3 i 4, powinno się zastosować bardziej optymalną metodę unieszkodliwiania danych odpadów (może to być oczywiście inna metoda termiczna) lub specjalne metody usuwania tych substancji z gazów odlotowych o jeszcze wyższej skuteczności.

Trzeba także pamiętać, że zastosowany system oczyszczania gazów odlotowych cechuje się skończoną skutecznością działania i tylko częściowo złagodzi skutki ewentualnych błędów popełnianych w sposobie realizacji procesu unieszkodliwiania odpadów (na etapie ich termicznego przekształcania). Z drugiej strony, możliwe jest prowadzenie tego procesu w sposób optymalny pod kątem zminimalizowania np. ilości powstających produktów niezupełnego spalania tlenków azotu oraz ilości popiołu lotnego unoszonego z paleniska, co pozwala m.in. na łatwiejszą realizację oczyszczania gazów odlotowych do zadanego poziomu czy też uniknięcie chwilowych wzrostów emisji zanieczyszczeń.

4. Podsumowanie

Przedstawiona analiza przydatności wybranych systemów do usuwania określonych ładunków zanieczyszczeń ze spalin unoszonych z procesu spalania odpadów niebezpiecznych powinna być przydatna w procedurze decyzyjnej doboru systemu oczyszczania gazów odlotowych lub modernizacji układów już istniejących. Zaproponowany sposób doboru zalecanej konfiguracji całego systemu oparty jest na znajomości maksymalnych stężeń tych zanieczyszczeń w spalinach surowych. Z uwagi na fakt, że oszacowanie tych stężeń w sposób w pełni wiarygodny i reprezentatywny nie zawsze jest możliwe, powinny być one przyjmowane z pewnym zakresem tolerancji.

Innym sposobem postępowania jest zaufanie producentom lub dostawcom poszczególnych urządzeń (technologii) oczyszczania gazów odlotowych w zakresie gwarantowanego stężenia wylotowego danej substancji. Gwarancje te są jednak często uzależnione od granicznego stężenia na wlocie (do jakiego jeszcze obowiązują), a w wypadku konieczności zastosowania systemu składającego się z elementów pochodzących od różnych dostawców nie zawsze łatwe jest określenie łącznej skuteczności ich działania. Czasem nie bierze się tutaj pod uwagę faktu, że niektóre urządzenia (instalacje) przeznaczone do oczyszczania gazów odlotowych z określonych grup substancji w pewnym stopniu usuwają także inne zanieczyszczenia, których redukcja przy pomocy innych metod nie musi się już odbywać z maksymalną skutecznością, wynikającą wprost z potrzeby spełnienia odpowiednich wartości dopuszczalnych do wprowadzania do powietrza.

Dlatego, jeśli tylko możliwy jest wstępny dobór systemu oczyszczania gazów odlotowych z uwzględnieniem metody opartej na stężeniach granicznych zamieszczonych w tabelach 3 i 4, to jest to godne polecenia. Metoda ta wydaje się szczególnie przydatna, gdy dana instalacja przeznaczona do spalania odpadów niebezpiecznych już istnieje i wymaga modernizacji polegającej na wyposażeniu w dodatkowe urządzenia zapewniające nieprzekraczanie określonych norm emisji. Z reguły dobrze znana jest wówczas skrajna zawartość w gazach surowych substancji konfliktowych (których emisja musi ulec redukcji) bez względu na rodzaj spalanych odpadów. W tego typu działaniach bardzo istotną rolę odgrywa także czynnik ekonomiczny. Zaproponowany sposób wstępnego doboru systemu oczyszczania gazów odlotowych ukierunkowany na znalezienie konfiguracji najbardziej optymalnej (umożliwiającej osiągnięcie założonego celu przy jak najmniej rozbudowanym układzie) pozwala na oczywiste zminimalizowanie kosztów.

Literatura

- [1] Acharya P., DeCicco S.G., Novak R.G.: Factors that can Influence and Control the Emissions of Dioxins and Furans from Hazardous Waste Incinerators. J. Air & Waste Manage. Assoc. 1991, vol. 41, No 12, 1605–1615

- [2] Council Directive 94/67/EC of 16 December 1994 on the incineration of hazardous waste. OJ No L 365, 31.12.1994, 34
- [3] Ide Y., Kashiwabara K., Okada S., Mori T., Hara M.: Catalytic decomposition of dioxin from MSW incinerator flue gas. *Chemosphere*, vol. 32, No 1, 1996, 189–198
- [4] Ishida M., Shiji R., Nie P., Nakamura N., Sakai S.: Full-scale plant study on low temperature thermal dechlorination of PCDDs/PCDFs in fly ash. *Chemosphere*, vol. 37, No 9–12, 1998, 2299–2308
- [5] Oleniacz R., Mazur M., Bogacki M.: Emisja metali ciężkich ze spalania odpadów niebezpiecznych. *Półrocznik AGH, Inżynieria Środowiska*, t. 2, 1997, 49–63
- [6] Oleniacz R., Mazur M., Bogacki M.: Emisja zanieczyszczeń ze spalania odpadów niebezpiecznych w piecu obrotowym. *Ekoinżynieria*, nr 1, 1998, 16–24
- [7] Oleniacz R.: Termiczna utylizacja odpadów niebezpiecznych a emisja zanieczyszczeń. Część I–IV. Sprawozdania z badań własnych AGH nr 10.10.150.471. Kraków, Katedra Kształtowania i Ochrony Środowiska AGH 1996–99 (prace niepublikowane)
- [8] Oleniacz R.: Skuteczność realizacji pierwotnych metod ograniczania emisji zanieczyszczeń i oczyszczania gazów odlotowych z termicznego unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych. Sprawozdanie z badań własnych AGH nr 10.10.150.490. Kraków, Zakład Kształtowania i Ochrony Środowiska AGH 2000 (praca niepublikowana)
- [9] Oleniacz R.: Oczyszczanie gazów odlotowych ze spalania odpadów niebezpiecznych. *Półrocznik AGH, Inżynieria Środowiska*, t. 5, z. 2, 2000, 363–382
- [10] Wielgosiński G.: Oczyszczanie gazów odlotowych z procesu spalania odpadów. *Ekologia i Technika*, vol. VI, nr 3, 1998, 67–7