

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 15**  
(październik–grudzień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

**Rok VI**

**Warszawa–Opole 2013**

---

FRANCISZEK SŁADECZEK\*

EWA GŁODEK\*\*

LUCYNA JANECKA\*\*\*

# Badania obiegu metali lotnych (Hg, Tl, Cd) w procesie wypalania klinkieru Część 2 – Badania obiegu metali lotnych w przemysłowych instalacjach pieca obrotowego

**Słowa kluczowe:** emisja metali, obieg metali lotnych, wypalanie klinkieru.

W części 1 artykułu przedstawiono rozpoznanie literaturowe tematu – charakterystykę fizykochemiczną metali (Hg, Tl, Cd) i ich związków, zasady obiegu tych metali w instalacji pieca cementowego, poziomy ich zawartości w surowcach, paliwach i klinkierze portlandzkim oraz obowiązujące limity emisyjne do powietrza. W części 2 zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych lotności pierwotnej Hg, Tl i Cd w surowcach stosowanych w procesie, badania identyfikacyjne poziomu oraz obiegu tych metali w procesie wypalania klinkieru w dwóch przemysłowych instalacjach pieca obrotowego. Zawartości metali lotnych wahają się znacznie w zależności od rodzaju stosowanych surowców i paliw, zwłaszcza paliw alternatywnych. Na podstawie bilansów metali lotnych, wykonanych dla dwóch różnych instalacji wypalania klinkieru, stwierdzono różnice obiegu tych metali związane z rodzajem instalacji i stosowanymi surowcami i paliwami.

## 1. Wprowadzenie

Przemysł cementowy obok energetyki jest jednym z głównych źródeł emisji metali ciężkich. Badania dotyczące emisji metali ciężkich dotychczas prowadzone były głównie w instalacjach energetycznych lub w spalarniach odpadów. W dostępnej literaturze dotyczącej przemysłu cementowego badania obiegu metali

---

\* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, f.sladeczek@icimb.pl

\*\* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, e.glodek@icimb.pl

\*\*\* Dr inż., Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, l.janecka@icimb.pl

ciężkich polegały przede wszystkim na określeniu wielkości emisji tych metali, skuteczności urządzeń odpylających itp. [1–10, 14]. Tylko w nielicznych pracach analizowano zjawiska obiegu metali lotnych w procesie wytwarzania [3, 9]. Ze względu na istotne różnice związane ze specyfiką procesu wytwarzania energii i procesu produkcji cementu zaistniała celowość podjęcia stosownych badań.

Podstawą oceny zjawiska obiegu metali lotnych jest bilans wykonany dla warunków technologicznych pieca obrotowego do wypalania klinkieru, oparty na: wynikach pomiarów przepływowych i cieplnych instalacji, oznaczeniach z pobranych podczas prób materiałów i paliw oraz wynikach oznaczeń laboratoryjnych zawartości składników lotnych we wszystkich podstawowych strumieniach masy (mąka piecowa, mąka gorąca, klinkier, pyły z odpylacza, pyły z bypassa, unos, paliwa).

Obliczenia teoretyczne obiegów metali lotnych zostały skonfrontowane z bilansem rzeczywistym, wykonanym na podstawie wyników analiz próbek pobranych z instalacji. Wyniki obliczeń i analiz pozwolą na ustalenie najważniejszych czynników wpływających na wzrost koncentracji metali lotnych w obiegach pieca i wymiennika, a obliczenia symulacyjne pozwolą na określenie możliwości zwiększenia wykorzystania paliw alternatywnych, będących największym źródłem metali lotnych.

Przedstawiony etap badań dąży do poszerzenia wiedzy nierozpoznanego dotąd całkowicie zjawiska obiegu lotnych metali w procesie produkcji klinkieru cementowego. Efekty badań, uzyskane w warunkach technicznych, są podstawą do opracowania metodologii wyznaczania obiegu metali lotnych oraz określenia współczynników lotności tych metali.

Docelowo wyniki takich badań mogą być wykorzystane do określenia wskaźników uwalniania Hg, Cd i Tl do raportowania PRTR (Europejski Rejestr Uwalniania i Transferu Zanieczyszczeń) dla różnych typów pieców stosowanych w Polsce.

Przedstawiona praca stanowi początkowy etap badań dotyczących obiegów metali lotnych (Hg, Cd, Tl) w piecu cementowym pod kątem kontroli i obniżenia emisji tych metali do powietrza.

## **2. Badania obiegu metali lotnych (Hg, Tl, Cd)**

### **2.1. Metodyka badawcza**

Podstawą obliczeń bilansów są wyniki pomiarów technologicznych oraz dane z automatycznego rejestru centralnej sterowni uzyskane podczas 12-godzinnego testu układu wypalania klinkieru, jak również wyniki analiz próbek klinkieru, mąki surowcowej, pyłów i paliw pobrane w trakcie wykonywania pomiarów bilansowych.

Pomiary przemysłowe zostały wykonane przez grupę pomiarową akredytowanego Laboratorium Pomiarów Przemysłowych i Środowiska Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu (certyfikat Polskiego Centrum Akredytacji nr AB 799) w dwóch zakładach cementowych. Oznaczenia zawartości metali w pobranych próbach zostały wykonane w akredytowanych laboratoriach: ENERGOPOMIAR Sp. z o.o. w Gliwicach (rtęć oznaczono przy wykorzystaniu metody absorpcyjnej spektrometrii atomowej techniką amalgamacji, kadm i tal metodą emisyjnej spektrometrii atomowej ze wzbudzeniem w plazmie indukcyjnie sprzężonej [ICP-OES]) oraz w ALS Laboratory Group Praga (oznaczenia wykonano metodą ICP-MS).

## 2.2. Badania identyfikacyjne obiegu metali lotnych na instalacjach przemysłowych

### Określenia lotności pierwotnej i wtórnej

Współczynniki lotności pierwotnej  $E_1$  obliczono w oparciu o wyniki badań laboratoryjnych. Próbkę materiału surowcowego (nadawy piecowej) wypalano przez 30 min w piecu laboratoryjnym w temperaturze 120, 350, 600, 800°C. Temperaturę wypalania wytypowano poprzez analogię do instalacji piecowej, biorąc pod uwagę temperaturę materiału w poszczególnych stopniach typowego wymiennika cyklonowego. W tabeli 1 oraz na rycinie 1 podano zmianę zawartości metali lotnych w wypalonym materiale w zależności od temperatury. Największą lotność wykazuje rtęć (ulatnia się w zakresie temperatury 120–350°C), następnie tal (ulatnia się w zakresie temperatury 350–600°C). Kadm jest w tej temperaturze metalem o najniższej lotności.

Tabela 1

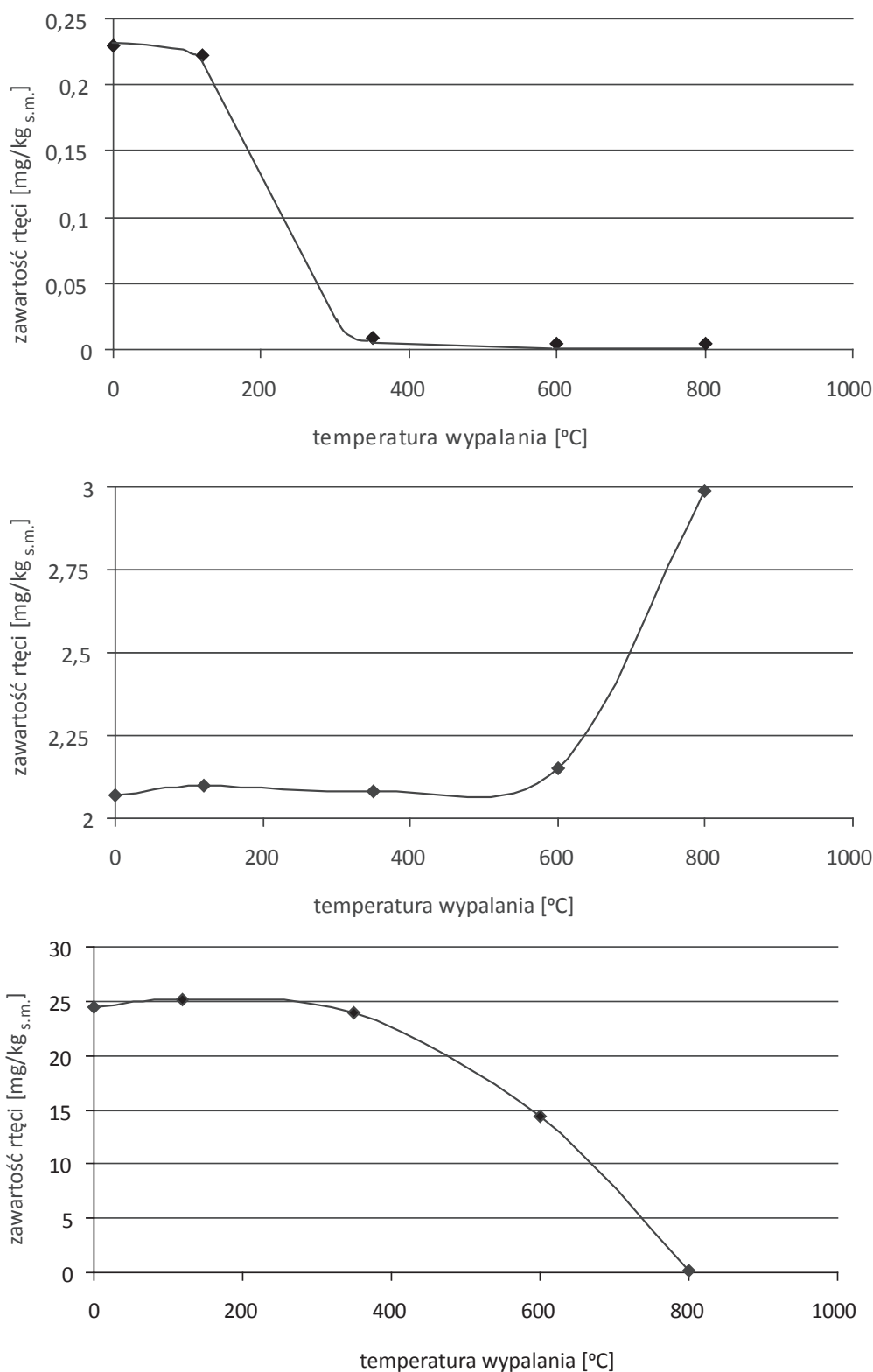
*Zmiana zawartości metali lotnych w materiale wypalany w piecu laboratoryjnym*

Temperatura wypalania	Zawartość pierwiastka [mg/kg <sub>s.m.</sub> ]		
	Hg	Cd	Tl
Próba pierwotna (niewypalana)	0,23±0,068	2,07±0,389	24,4±6,734
120	0,222±0,657	2,1±0,3948	25,2±6,995
350	0,009±0,00266	2,08±0,3910	24,0±6,624
600	0,004±0,00118	2,15±0,4042	14,4±3,97
800	0,004±0,00118	2,99±0,562	<0,1±0,027

Źródło: Badania własne.

Wyniki zawartości kadmu wykazują wzrost jego stężenia w temperaturze 800°C. W przedziale temperatury 120–600°C zawartość ta jest praktycznie niezmienna. Biorąc pod uwagę wysoką niepewność analiz badanych metali (rzędu 20%), przyjęto stały poziom stężenia kadmu w całym zakresie temperatury i zmia-

nę jego zawartości na poziomie  $0,1 \text{ mg/kg}_{\text{s.m.}}$  (granica oznaczalności). Innymi słowy dla badanej próbki w zakresie temperatury wypalania  $120\text{--}800^\circ\text{C}$  kadm okazał się metalem nielotnym.



Źródło: Badania własne.

Ryc. 1. Uwalnianie rtęci, kadmu i talu w wypalonym materiale

Lotność wtórna  $E_2$  oraz współczynniki absorpcji  $a$  obliczono w oparciu o dane bilansu rzeczywistego. Lotność wtórną wyznaczono jako stopień odparowania metalu w badanej instalacji, a stopień absorpcji jako ilość składnika zaabsorbowaną w wymienniku. Wartości współczynnika lotności wtórnej i współczynnika absorpcji dla badanych instalacji podano w tabeli 2.

Tabela 2

*Współczynniki lotności pierwotnej, wtórnej i współczynniki absorpcji dla badanych instalacji*

Parametr	Metal					
	rtęć		kadm		tal	
	instalacja I	instalacja II	instalacja I	instalacja II	instalacja I	instalacja II
Lotność pierwotna $E_1$	0,983	0,983	0,049	0,049	0,996	0,996
Lotność wtórna $E_2$	0,997	0,985	0,700	0,350	0,990	0,530
Współczynnik absorpcji $a$	0,003	0,015	0,300	0,650	0,010	0,470

Źródło: Opracowanie własne.

### Badania identyfikacyjne w instalacjach przemysłowych

Przeprowadzone obserwacje i badania pozwoliły ustalić poziom zawartości metali lotnych Hg, Cd i Tl w surowcach, paliwach oraz w materiale pobieranym podczas prób technologicznych z różnych miejsc instalacji piecowych. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3

*Zawartości metali lotnych Hg, Cd i Tl w surowcach, paliwach oraz w materiale pobieranym podczas prób technologicznych na instalacji I i II*

Rodzaj materiału	Zawartość metali lotnych [mg/kg <sub>s.m.</sub> ]					
	rtęć		kadm		tal	
	instalacja I	instalacja II	instalacja I	instalacja II	instalacja I	instalacja II
Nadawa piecowa	0,203	0,901	1,98	0,969	26,80	2,54
Mąka po IV cyklonie	0,002	< 0,050	57,20	4,970	< 0,10	< 2,00
Mąka po III cyklonie	0,002	n.o.	10,40	n.o.	8,26	n.o.
Mąka na wlocie do pieca	0,002	< 0,050	57,20	6,910	< 0,10	< 2,00
Klinkier	0,001	< 0,050	1,40	1,048	< 0,10	< 2,00
Pył z bypassa	0,008	< 0,050	324,00	6,260	15,50	< 2,00
Pył z filtra piecowego	0,866	1,590	5,24	1,010	250,00	17,80
Pył z chłodnika za filtrem	n.o.	< 0,050	n.o.	1,905	n.o.	< 2,00
Pył z chłodnika za cyklonami	n.o.	< 0,050	n.o.	1,053	n.o.	< 2,00

n.o. – brak danych.

Źródło: Opracowanie własne.

### 3. Bilanse teoretyczne i rzeczywiste obiegu metali lotnych

#### Bilanse teoretyczne

Podstawą obliczeń bilansu Hg, Cd i Tl są wyniki analiz prób mąki surowcowej, materiału z układu wypalania, klinkieru i paliw pobranych w trakcie wykonywania pomiarów bilansowych. Do obliczeń bilansu teoretycznego wykorzystano metody rachunkowe opracowane przez Ritzmanna, Webera i Krefta [11–13]. Na podstawie tych obliczeń można ocenić ilość składników lotnych na wejściu do pieca, krążących w obiegu oraz pozostających w klinkierze. Do obliczeń przyjęto współczynniki lotności pierwotnej i wtórnej wyznaczone empirycznie (tab. 2).

Przebieg obliczeń modelowych przedstawiono poniżej.

1. Ilość składnika lotnego „i” krążącego w fazie gazowej  $X_i$ :

$$X_i = a_i \frac{(E_{1i} \cdot c_i + Br_i)}{1 - a_i \cdot E_{2i}}$$

2. Ilość składnika lotnego „i” w wypalonym materiale na wlocie do pieca:

$$c_i + X_i$$

3. Ilość składnika lotnego „i” w obiegu z fazy gazowej:

$$E_{2i} \cdot X_i$$

4. Ilość składnika lotnego „i” wysublimowanego z surowca:

$$E_{1i} \cdot c_i$$

5. Ilość składnika lotnego „i” wchodząca w skład klinkieru z surowca:

$$(1 - E_{1i}) \cdot c_i$$

6. Ilość składnika lotnego „i” wchodząca w skład klinkieru z fazy gazowej:

$$(1 - E_{2i}) \cdot X_i$$

7. Całkowita ilość składnika lotnego „i” wchodząca w skład klinkieru:

$$R_i = (1 - E_{1i}) \cdot c_i + (1 - E_{2i}) \cdot X_i$$

8. Całkowita ilość składnika lotnego w fazie gazowej wraz z udziałem z paliwa:

$$Br_i + E_{2i} \cdot X_i + E_{1i} \cdot c_i$$

9. Ilość składnika lotnego „i” zaadsorbowanego przez mąkę w wymienniku cyklonowym:

$$(Br_i + E_{2i} \cdot X_i + E_{1i} \cdot c_i) \cdot a_i$$

10. Ilość składnika „i” emitowanego z układu technologicznego:

$$E_i = (Br_i + E_{2i} \cdot X_i + E_{1i} \cdot c_i) \cdot (1 - a_i)$$

11. Bilans

$$R_i + E_i = c_i + Br_i$$

Oznaczenia:

c – zawartość składnika w surowcu w g/kg klinkieru,

Br – zawartość składnika w paliwie.

Wyniki obliczeń obiegu składników lotnych w instalacji piecowej przedstawiono w tabelach 4–6.

Tabela 4

Bilans teoretyczny badanych instalacji piecowych

Parametr	Składnik lotny [mg/kgkl]					
	kadm		tal		rtęć	
	instalacja I	instalacja II	instalacja I	instalacja II	instalacja I	instalacja II
Zawartość składnika w nadawie surowcowej mg/kg <sub>s.m.</sub>	2	2,54	24,4	2,54	0,23	0,901
Zawartość składnika w paliwie ekwiwalentnym mg/kg <sub>s.m.</sub>	10,2	2,51	2,51	2,51	0,211	0,211
c mg/kg klinkieru	3,2928	3,98272	38,2592	3,98272	0,36064	1,412768
Br mg/kg klinkieru	1,4239	0,2792	0,3504	0,2792	0,0295	0,0070
E <sub>1</sub>	0,1	0,9959	0,9959	0,9959	0,9826	0,9826
E <sub>2</sub>	0,29	1	1	1	0,995	0,995
a	0,3	0,47	0,01	0,47	0,003	0,015
1. Ilość składnika lotnego „i” krążącego w fazie gazowej X <sub>i</sub> *	0,5761	0,1951	0,3884	3,7650	0,0012	0,0212
2. Ilość składnika lotnego „i” przed wymiennikiem cyklonowym*	3,8689	1,7144	38,6476	7,7477	0,3618	1,4340
3. Ilość składnika lotnego „i” w obiegu z fazy gazowej	0,1671	0,0566	0,3884	3,7650	0,0011	0,0211
4. Ilość składnika lotnego „i” wysublimowanego z surowca*	0,3293	0,1519	38,1023	3,9664	0,3544	1,3882
5. Ilość składnika lotnego „i” wchodząca w skład klinkieru z surowca*	2,9635	1,3675	0,1569	0,0163	0,0063	0,0246



cd. tab. 4

Parametr	Składnik lotny [mg/kgkl]					
	kadm		tal		rtęć	
	instalacja I	instalacja II	instalacja I	instalacja II	instalacja I	instalacja II
6. Ilość składnika lotnego „i” wchodząca w skład klinkieru z fazy gazowej*	0,4090	0,1385	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
7. Całkowita ilość składnika lotnego „i” wchodząca w skład klinkieru*	3,3725	1,5059	0,1569	0,0163	0,0063	0,0247
8. Całkowita ilość składnika lotnego „i” w fazie gazowej wraz z udziałem z paliwa*	1,9203	0,3001	38,8411	8,0105	0,3850	1,4163
9. Ilość składnika lotnego „i” zaabsorbowana w wymienniku cyklonowym*	0,5761	0,1951	0,3884	3,7650	0,0012	0,0212
10. Ilość składnika lotnego „i” emitowanego z układu technologicznego*	1,3442	0,1050	38,4527	4,2456	0,3838	1,3951
Bilans $R_i + E_i$	4,7167	1,6110	38,6096	4,2619	0,3901	1,4197
Bilans $c_i + Br_i$	4,7167	1,6110	38,6096	4,2619	0,3901	1,4197

\* – ilości składników lotnych w poz. 1–10 w mg/kg klinkieru.

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

### Bilanse rzeczywiste

Podstawą obliczeń bilansu metali są wyniki bilansu masowo-cieplnego instalacji piecowych I oraz II (ryc. 2 i 4) oraz wyniki analiz prób klinkieru, mąki surowcowej, pyłów i paliw pobranych w trakcie wykonywania pomiarów (tab. 3).

Instalację I stanowi piec metody suchej z 4-stopniowym wymiennikiem cyklonowym i kalcynatorem typu AT (powietrze do spalania wprowadzane przez piec) oraz bypassem (odciąg części gazów i pyłów piecowych na zewnątrz). Stosowane są paliwa alternatywne stałe (w skrócie PAS), zużyte opony oraz węgiel kamienny.

Instalację II stanowi piec metody suchej z 4-stopniowym wymiennikiem cyklonowym i kalcynatorem typu AT oraz bypassem (odciąg części gazów i pyłów piecowych z zawrotem do wymiennika). Stosowanym paliwem jest wyłącznie węgiel kamienny.

Wyniki bilansu rzeczywistego przedstawiono w tabelach 5 i 6 oraz na rycinach 3 i 5.

T a b e l a 5

*Bilans rzeczywisty – instalacja I*

Bilans układu piecowego	Rtęć	Kadm	Tal
	[mg/kgkl]		
Przychód			
Węgiel piec	0,010	0,499	0,062
PAS piec	0,018	0,579	0,010
Opony	0,001	0,329	0,275
Nadawa (surowiec + unos)	0,346	3,374	45,674
Razem	0,375	4,781	46,021
Rozchód			
Pyły piecowe	0,118	0,714	34,054
Pyły bypassa	0,000	2,838	0,136
Klinkier	0,001	1,400	0,100
Razem	0,119	4,952	34,290

różnica bilansowa	0,256	-0,170	11,731
błąd [%]	68,27	-3,55	25,49

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.

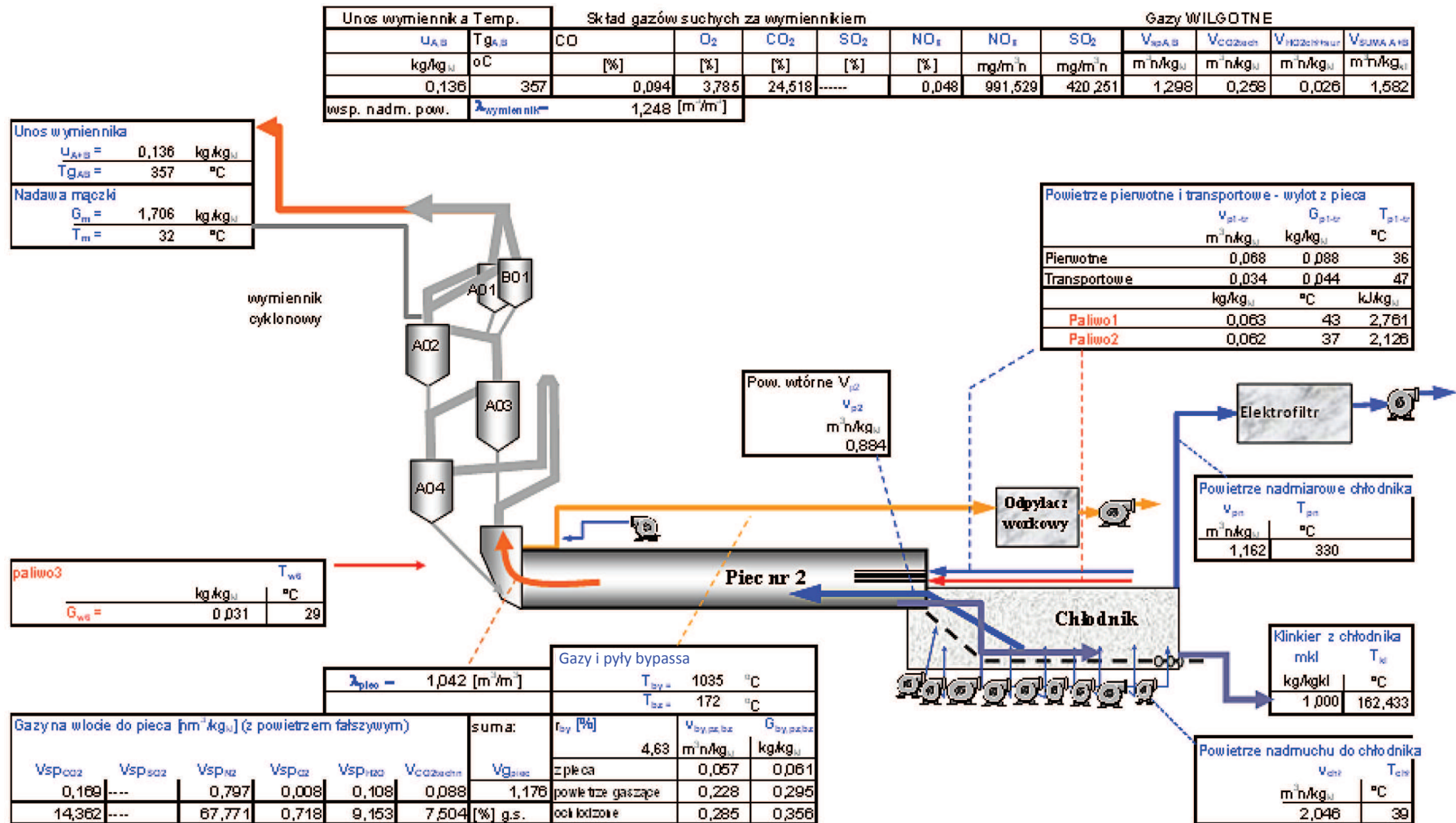
T a b e l a 6

*Bilans rzeczywisty – instalacja II*

Bilans układu piecowego	Rtęć	Kadm	Tal
	[mg/kgkl]		
Przychód			
Węgiel piec	0,006	0,089	0,207
Mąka surowcowa	1,589	1,707	4,480
Razem	1,596	1,796	4,750
Rozchód			
Pyły piecowe	0,380	0,241	4,252
Pyły bypassa	0,000	0,025	0,074
Klinkier	0,050	1,048	2,000
Razem	0,430	1,314	6,326

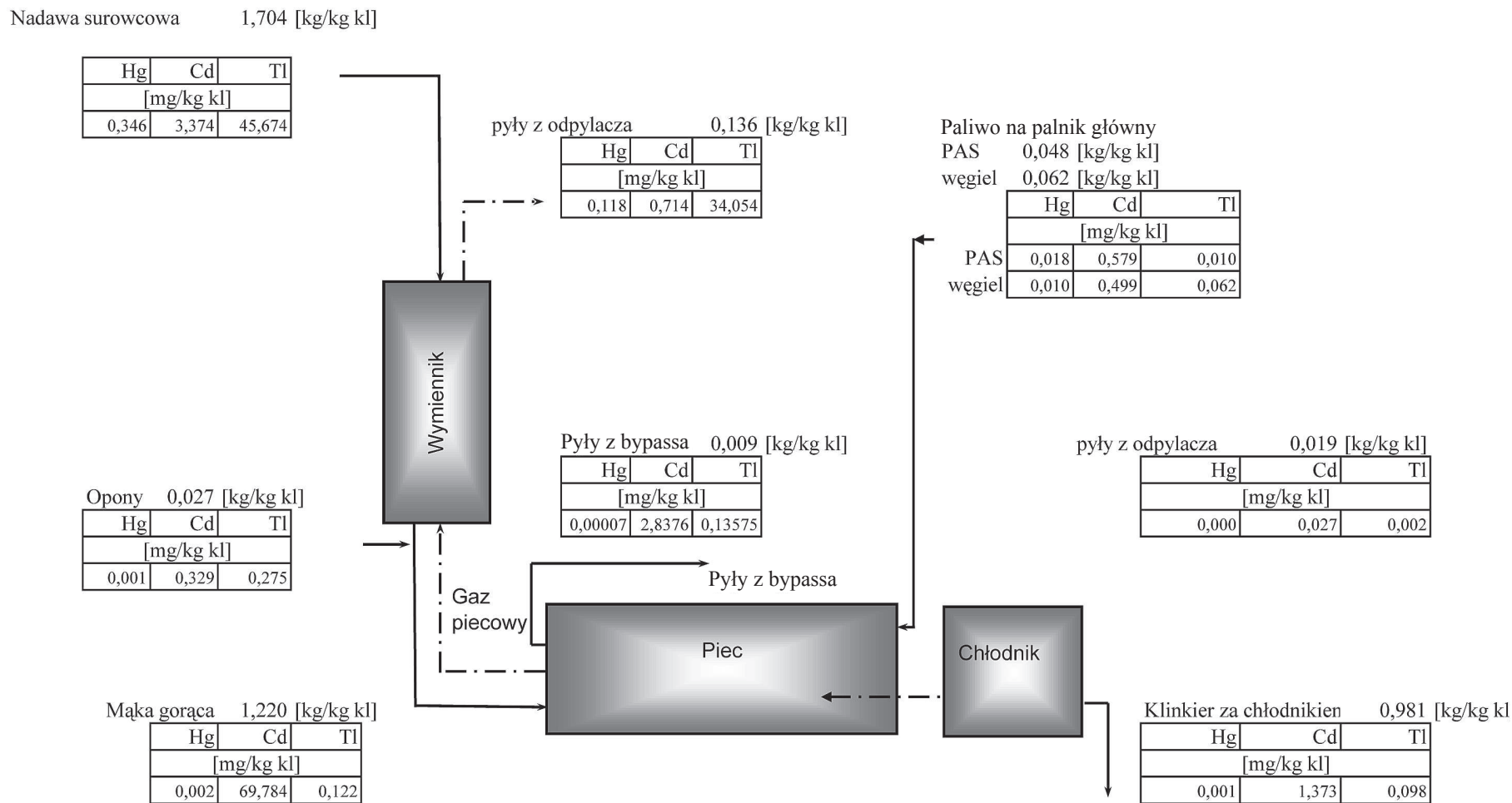
różnica bilansowa	1,166	0,482	-1,576
błąd [%]	73,06	26,83	33,18

Ź r ó d ł o: Opracowanie własne.



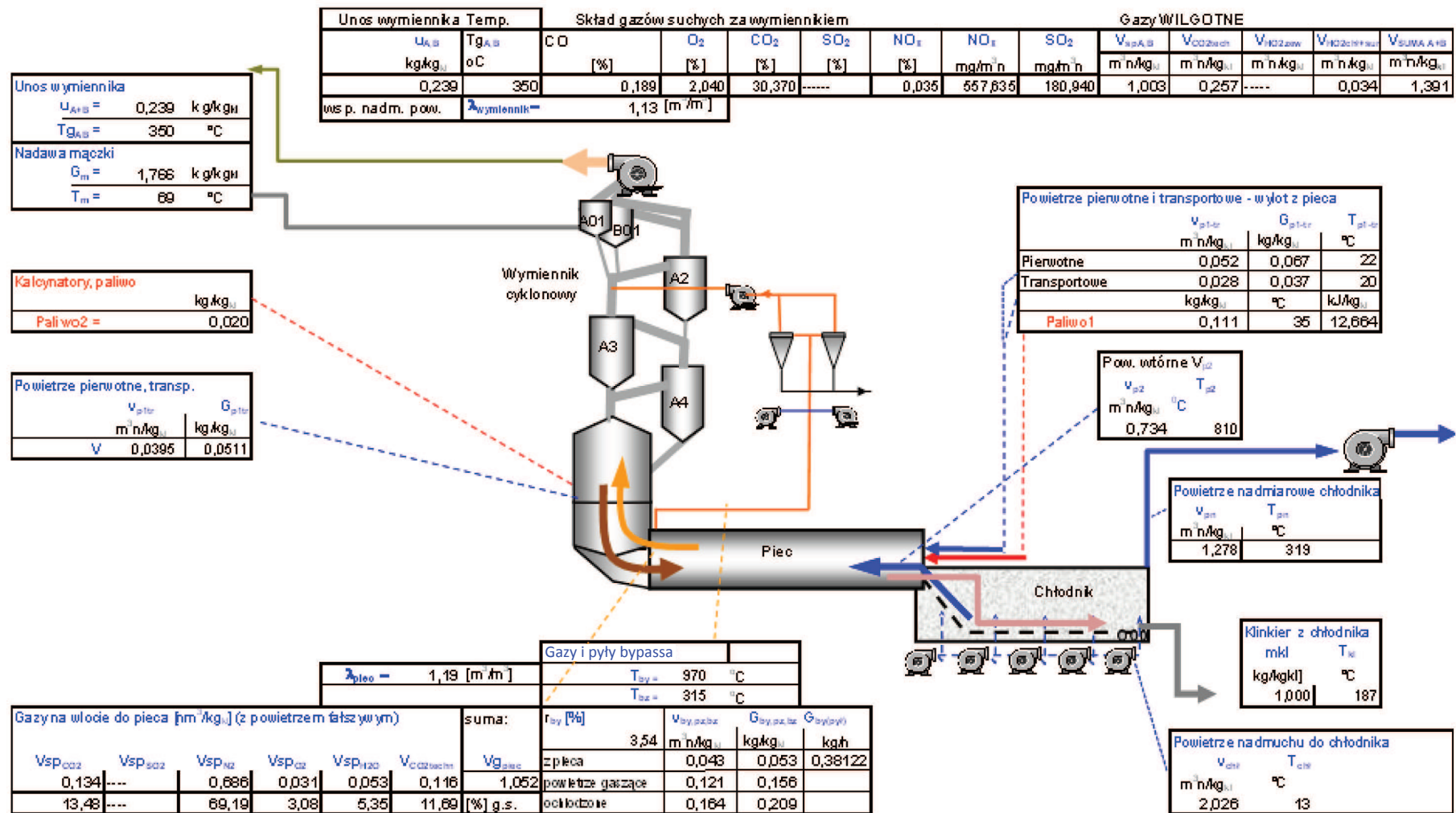
Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 2. Bilans masowo-ciepły instalacji I



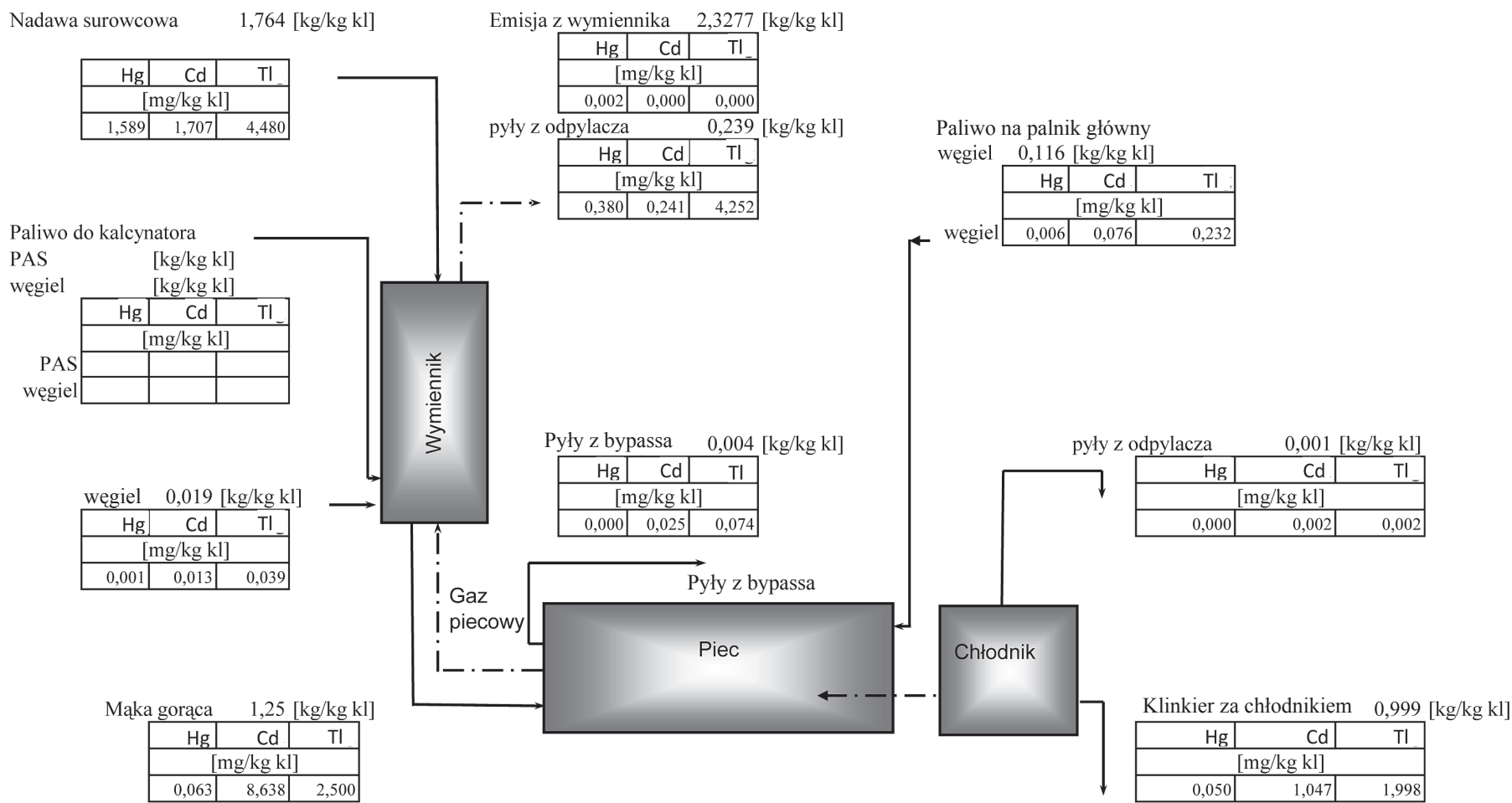
Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 3. Bilans obiegu metali w instalacji I



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 4. Bilans masowo-ciepły instalacji II



Źródło: Opracowanie własne.

Ryc. 5. Bilans obiegu metali w instalacji II

## 4. Podsumowanie i wnioski

1. W oparciu o przeprowadzone badania zachowania się metali lotnych (tab. 1) pod wpływem temperatury oraz w oparciu o wyniki bilansów można stwierdzić, że lotne metale Hg i Tl w instalacji wypalania klinkieru w obrębie wymiennika prawie całkowicie odparowują. Na przedstawionych wykresach (ryc. 1) widać, że odparowanie rtęci następuje już w temperaturze ok. 150°C, talu powyżej 350°C. W zakresie temperatury do 800°C kadm okazał się metalem nielotnym.

2. Na podstawie bilansów wykonanych dla 2 różnych instalacji wypalania klinkieru widać różnice w obiegu badanych metali lotnych – w zależności od rodzaju instalacji oraz stosowanej technologii i paliw. Wykazują to wyraźnie bilanse rzeczywiste. W przypadku kadmu dla obu instalacji bilans całego układu metali zamyka się dość dobrze, co może być uzasadnione jego niską lotnością. W odniesieniu do talu bilanse zamykają się gorzej, w granicach 25–33%, przy czym w przypadku instalacji I więcej talu jest po stronie przychodu, a w instalacji II po stronie rozchodu. Największe różnice, rzędu 68–73%, występują w bilansowaniu rtęci. Procentowo różnica bilansowa jest podobna dla obu pieców, chociaż do instalacji II wprowadzana jest znacznie większa ilość tego metalu. Tak duży niedobór po stronie rozchodu potwierdza wysoką lotność rtęci i jego cyrkulację na zewnątrz pieca (w układzie młyn surowca, odpylacz, zbiorniki zapasu), wynika także z ograniczonych możliwości pomiarowych w różnych miejscach instalacji.

3. W realizowanej pracy napotkano na duże trudności analityczne w oznaczaniu zawartości metali lotnych. Podana przez laboratorium niepewność pomiaru wynosi w przypadku Hg  $\pm 29,6\%$ , Cd  $\pm 18,8$ , a w odniesieniu do Tl  $\pm 27,6$ , co znacznie utrudniało ocenę zachowania się tych składników w procesie. Praktyka wykazała, że dla prawidłowej analizy konieczne jest zwielokrotnienie zarówno oznaczeń analitycznych, jak i badań w zróżnicowanych warunkach technologicznych. Konieczne jest także dopracowanie metodyki bilansowej obejmującej nie tylko instalacje piecową, ale także młyn surowca i zbiorniki zapasu mąki piecowej.

## Literatura

[1] Schreiber R.J., Kellett C.D., *Compilation of mercury emissions data*, Portland Cement Association, Skokie 2009.

[2] Sikkema J.K., Alleman J.E., Ong S.K., Wheelock T.D., *Mercury regulation, fate, transport, transformation, and abatement within cement manufacturing facilities*, „Review Science of the Total Environment” 2011, Vol. 409, s. 4167–4178.

[3] Mlakar T.L., Horvat M., Vuk T., Stergaršek A., Kotnik J., Tratnik J., Fajon V., *Mercury species, mass flows and processes in a cement plant*, „Fuel” 2010, Vol. 89, s. 1936–1945.

[4] Schreiber R.J., Kellett C.D., Joshi N., *Inherent Mercury Controls Within the Portland Cement Kiln System*, PCA R&D Serial No, 2841, Portland Cement Association 2005, www.cement.org (20.03.2012).

- [5] Cement, Lime and Magnesium Oxide Manufacturing Industries, Dokument Referencyjny BAT, May 2010, <http://eippch.jrc.es/reference/> (2.03.2012).
- [6] Mercury in the cement industry, Universite de Liege, Cembureau – CSI, April 2009, [http://www.unep.org/hazardoussubstances/Portals/9/Mercury/A\\_Inventories20Industry%20-%20Hg%20report%20CEMBUREAU%20April%202010.pdf](http://www.unep.org/hazardoussubstances/Portals/9/Mercury/A_Inventories20Industry%20-%20Hg%20report%20CEMBUREAU%20April%202010.pdf) (21.03.2012).
- [7] Sch ä f e r S., H o e n i g V., Effect of kiln operation on the behavior of mercury in the clinker burning process presented at the VDZ Congress, Düsseldorf, Germany, September 23–27, 2002.
- [8] Hills L.M., Stevenson R.W., *Mercury and lead content in raw materials*, PCA R&D Serial No. 2888, 2006, [www.cement.org](http://www.cement.org) (12.03.2012).
- [9] Larsen M.B., Schmidt I., Paone P., Salmento J., Petersen A., Jørgensen A.W., *Mercury in cement production – a literature review*, FLSmidth internal report, 2007.
- [10] S ł a d e c z e k F., G ł o d e k E., Określenie wskaźników emisji metali Hg, Cd i Tl dla pieców cementowych w Polsce. Prace statutowe ICiMB 4J010P10.
- [11] Weber P., *Alkaliprobleme und Alkalibeseitigung bei wärmesparenden Trockendrehöfen*, „Zement – Kalk – Gips” 1964, Nr. 8.
- [12] Kreft W., *Methode zur Vorausberechnung von Schadstoffkreisläufen Zementöfen*, „Zement – Kalk – Gips” 1982, Nr. 9.
- [13] Kreft W., *Alkali- und Schwefelverdampfung in Zementöfen in Gegenwart hoher Chloreinnahmen*, „Zement – Kalk – Gips” 1985, Nr. 8.
- [14] G ł o d e k E., S ł a d e c z e k F., *Rtęć w układzie pieca cementowego*, „Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych” 2012, nr 11.

FRANCISZEK SŁADECZEK  
EWA GŁODEK  
LUCYNA JANECKA

## RESEARCH OF CYCLES OF VOLATILE METALS (HG, TL, CD) IN CEMENT KILNS

PART 2 – RESEARCH OF VOLATILE METALS CYCLE IN ROTARY KILNS  
FOR CLINKER BURNING

**Keywords:** emission of metals, cycle of volatile metals, clinker burning.

In part 1 of the paper recognition of the state of the art – physico-chemical characteristics of metals (Hg, Tl, Cd) and their compounds, the rules of circulation of these metals in the cement kiln system, the levels of their content in the raw materials, fuels and clinker as well as existing emission limits to air were presented. In part 2 laboratory studies of primary and secondary volatile Hg, Tl and Cd in raw materials, identification of the level of these metals and their cycle research in the two industrial rotary cement kilns were executed. Quantity of volatile metals depends on the type of raw materials and fuels, especially of alternative fuels. Based on the balance of volatile metals made for two installation of clinker burning differences were found in circulation of volatile metals related to the type of installation and raw materials and fuels used.



