

September 1, 2003

Ocena funkcjonowania instalacji oczyszczania gazów odlotowych z procesu grafityzacji elektrod węglowych w SGL Carbon S.A. w Nowym Sączu

Marian Mazur

Robert Oleniacz

Marek Bogacki

Przemysław Szczygłowski

OCENA FUNKCJONOWANIA INSTALACJI OCZYSZCZANIA GAZÓW ODLOTOWYCH Z PROCESU GRAFITYZACJI ELEKTROD WĘGLOWYCH W SGL CARBON S.A. W NOWYM SĄCZU

**Marian MAZUR, Robert OLENIACZ, Marek BOGACKI,
Przemysław SZCZYGLÓWSKI**

*e-mail: mmazur@uci.agh.edu.pl, e-mail: oleniacz@uci.agh.edu.pl, bogacki@uci.agh.edu.pl, szczyglo@uci.agh.edu.pl
Zakład Kształtowania i Ochrony Środowiska, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska,
Akademia Górniczo-Hutnicza
30-059 KRAKÓW, Al. Mickiewicza 30*

Streszczenie: W referacie dokonano ogólnej analizy przydatności poszczególnych elementów systemu oczyszczania gazów pogrąfityzacyjnych odprowadzanych z nowych pieców typu LWG (Castnera) zastosowanych w SGL Carbon S.A. w Nowym Sączu do grafityzacji elektrod węglowych oraz oceniono funkcjonowanie całej instalacji oczyszczania. Na ocenę tę duży wpływ miała uzyskana w wyniku przeprowadzonych badań całkowita skuteczność redukcji zanieczyszczeń w zastosowanym systemie oczyszczania, która zależała nie tylko od sprawności poszczególnych urządzeń, ale – niestety – także od specyficznego układu odprowadzenia gazów odlotowych, umożliwiające omijanie urządzeń oczyszczających przez część transportowanych gazów. Analiza przydatności poszczególnych metod oczyszczania oparta została głównie na ocenie efektów ich zastosowania, w tym stopnia redukcji stężeń wybranych składników oczyszczanych gazów.

1. Wstęp

Ograniczenie emisji zanieczyszczeń powietrza z procesu grafityzacji elektrod węglowych w SGL Carbon S.A. w Nowym Sączu na przestrzeni ostatnich lat przeprowadzono dwukierunkowo: poprzez zabudowę systemu oczyszczania gazów pogrąfityzacyjnych oraz zmianę samej technologii produkcji elektrod grafitowych. Oczyszczanie gazów odlotowych z tego procesu oparto na dopalaniu katalitycznym (reaktory typu SWINGHTERM-KORMORAN) oraz oczyszczaniu mokrym (instalacja odsiarczania pracująca metodą dwualkaliczną). Część stosowanych wcześniej pieców grafityzacyjnych Achesona [1, 2] zastąpiono z kolei piecami typu LWG (Castnera), uzyskując znaczne skrócenie cyklu produkcyjnego grafityzacji elektrod węglowych (w tym przypadku z kilkunastu dni do niecałej doby), a co za tym idzie – wzrost efektywności produkcji oraz ograniczenie zużycia energii elektrycznej. Skrócenie cyklu produkcyjnego wynikające z zastosowania pieców Castnera spowodowało także istotne zmniejszenie emisji szkodliwych substancji do powietrza, zwłaszcza w odniesieniu do masy grafityzowanych elektrod, a przy założeniu wielkości produkcji na stałym poziomie – również w skali roku.

Ocena funkcjonowania instalacji oczyszczania gazów pogrąfityzacyjnych oparta została głównie na kompleksowych pomiarach stężeń i strumieni masy wybranych substancji w gazach odlotowych z kilku cykli grafityzacyj-

nych elektrod węglowych w piecach typu LWG, wykonanych w różnych miejscach układu odprowadzenia i oczyszczania gazów pografityzacyjnych [3].

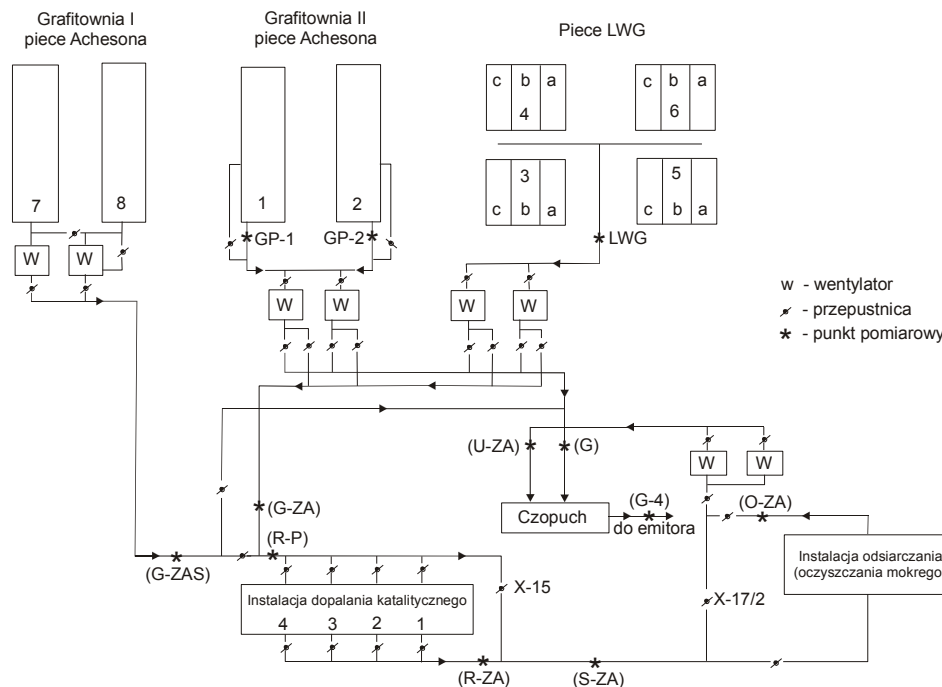
2. Charakterystyka obiektu badań

Obiektem badań była instalacja oczyszczania gazów odlotowych z Grafitowni SGL Carbon S.A. w Nowym Sączu w układzie z pracującym elektrycznym piecem oporowym typu LWG (Castnera). W piecu Castnera prąd jest doprowadzany bezpośrednio do rdzenia, który stanowią grafityzowane elektrody, a przepływ prądu następuje wzdłuż elektrod (dla porównania w piecach Achesona przepływ prądu jest poprzeczny w stosunku do grafityzowanych elektrod). W ten sposób w piecu typu LWG można grafityzować elektrody węglowe o porównywalnych kształtach i równych powierzchniach przekroju w miejscach ich wzajemnych połączeń, a technologia grafityzacji wymaga stosowania (w przeciwieństwie do pieców Achesona) tylko zasypki izolacyjnej. Na cztery piece LWG zainstalowane w SGL Carbon S.A. przypada trzy pokrywy ssące i dwa wentylatory, przy pomocy których odciągane są gazy pografityzacyjne (rys. 1). Jednocześnie może pracować tylko 1 piec z uwagi na obciążenie instalacji zasilającej oraz wydajność instalacji oczyszczających gazy odlotowe.

System oczyszczania gazów pografityzacyjnych składa się z instalacji dopalania katalitycznego i instalacji odsiarczania (oczyszczania mokrego), przy czym z uwagi na konieczność zapewnienia obejścia (używanego w przypadkach awaryjnych i w sytuacjach, gdy odciągane gazy nie wymagają danego sposobu oczyszczania), dla każdej z tych instalacji przewidziano tzw. by-pass, co zostało zaznaczone na rys. 1, przedstawiającym układ odprowadzenia i oczyszczania gazów odlotowych z Grafitowni SGL Carbon S.A. z zaznaczonymi punktami pomiarowymi. W praktyce część gazów pografityzacyjnych omija pierwszy, drugi lub obydwa węzły oczyszczania (w tym ostatnim przypadku gazy odprowadzane z pieca LWG wędrują bezpośrednio do czopucha komina) na skutek braku możliwości całkowitego domknięcia poszczególnych przepustnic.

Instalacja dopalania katalitycznego składa się z czterech reaktorów typu SWINGTHERM-KORMORAN 30.0, przy czym przewidziano równoczesną pracę trzech reaktorów (czwarty stanowi rezerwę). Każdy z nich wyposażony jest w wewnętrzny układ filtracyjny chroniący wypełnienie ceramiczne (pełniące funkcję wymiennika ciepła) i złożę katalityczne przed zanieczyszczeniem pyłem koksowo-grafitowym. Zastosowano tutaj wypełnienie ceramiczne KERATERM oraz katalizator platynowy o podwyższonej odporności na związki siarki. Reaktory pracują w układzie samo oczyszczającym się, co wynika z rewersyjnego charakteru przepływu gazów. Czas rewersji jest zmienny i optymalizowany przez mikroprocesorowy układ sterowania instalacji. Podczas pierwszego cyklu dopalane gazy przechodzą przez wypełnienie ceramiczne, a następnie przez katalizator, w którego centrum pobierają ciepło z grzałek elektrycznych. Gazy płyną dalej przez złożę katalizatora oraz drugą warstwę wypełnie-

nia ceramicznego oddają nadmiar ciepła, podgrzewając obydwie te warstwy. Po zmianie kierunku przepływu gazów sytuacja powtarza się, z tym że wchodzące gazy zostają wstępnie podgrzane korzystając ze zmagazynowanej wcześniej energii cieplnej. Temperatura w reaktorach zmienia się w zakresie 340÷425°C. Maksymalna temperatura gazów na wylocie wynosi 150°C.



Rys. 1. Schemat układu odprowadzenia i oczyszczania gazów odlotowych z pieców grafityzacyjnych

Zasadę mokrego procesu oczyszczania gazów oparto na odsiarczaniu spalin metodą dwualkaliczną. W skruberze natryskowym zachodzi jednocześnie odpylenie i usuwanie SO_2 oraz ewentualnie innych składników gazowych w wyniku zraszania gazów roztworem Na_2CO_3 , prowadzonego przy pomocy kilkustopniowego systemu dysz. W górnej części skrubera znajduje się odkraplacz wypełniony pierścieniami I-15 N. Jest on w sposób ciągły zmywany cieczą absorpcyjną za pomocą dodatkowego zespołu dysz. W odkraplaczu następuje oddzielenie niesionych wraz z gazami kropli cieczy absorpcyjnej i doczyszczanie gazów. Roztwór posorpcyjny spływa grawitacyjnie do osadnika labiryntowego, gdzie jest on regenerowany mlekiem wapiennym poprzez okresowe dozowanie wapna hydratyzowanego $\text{Ca}(\text{OH})_2$, co ma miejsce przy pH spadającym do poziomu ok. 7,5. Produktem końcowym mokrego oczyszczania gazów jest szlam zawierający głównie $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ i pył usunięty z gazów odlotowych. Instalacja została zaprojektowana na przepływ gazów rzędu 100000 m³/h i może pracować w zakresie temperatur gazów: 25÷150°C. Tem-

peratura w skruberze w czasie oczyszczania gazów odprowadzanych z instalacji dopalania katalitycznego wynosi ok. 40°C.

3. Charakterystyka gazów pografityzacyjnych

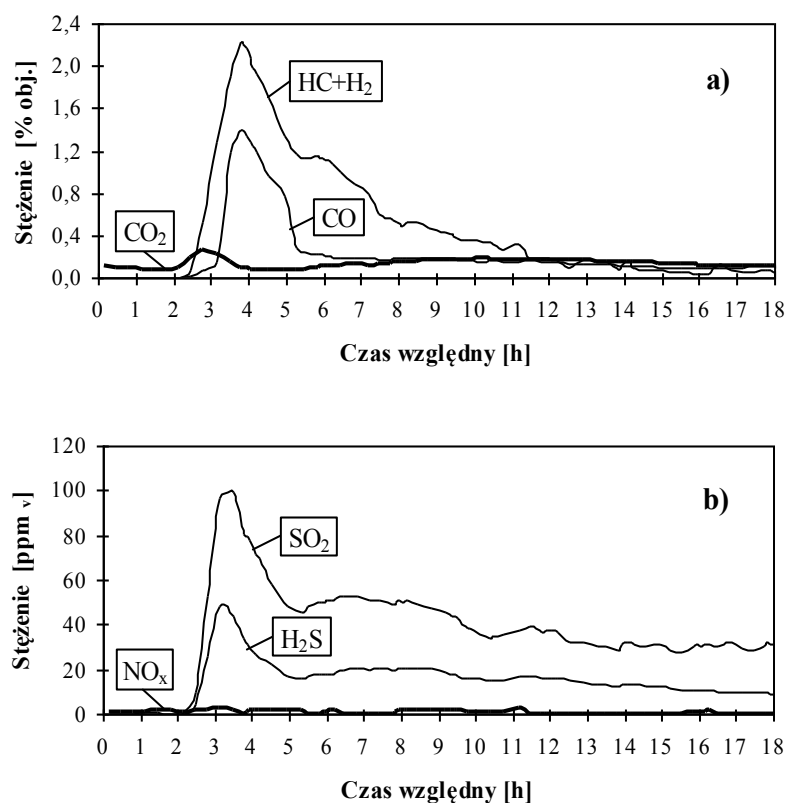
Gazy pografityzacyjne stanowią mieszaninę powietrza i gazów powstających w procesie grafityzacji wypalonych elektrod węglowych, polegającym na stopniowym ich ogrzewaniu do temperatury rzędu 2500÷2800°C. Na skutek zachodzących w elektrodach zmian fizycznych i chemicznych w czasie trwania danego cyklu produkcyjnego (tzw. szarży grafityzacyjnej) zmienia się także skład unoszonych z tego procesu gazów. W pierwszym etapie (do temperatury ok. 1500°C) odgazowaniu ulega wodór i siarka, w drugim etapie (1500÷1800°C) dla większości półwyrobów wytwarzanych z kokсів naftowych i lepiszcza pakowego następuje wzrost objętości (pęcznienie) o ok. 0,2÷0,6 %, w trzecim etapie (powyżej 2000°C) rozpoczyna się stopniowy proces grafityzacji materiału węglowego oraz oddestylowywanie składników popiołu. Znajduje to odzwierciedlenie w zmianach ilości zanieczyszczeń powietrza zawartych w gazach odprowadzanych z pieca grafityzacyjnego, pomimo znacznego ich rozcieńczenia powietrzem zasysanym poprzez nieszczelności pokrywy ssącej (zawartość O₂ w odciąganych gazach jest rzędu 20-21 %). Przykładowy przebieg zmienności stężeń objętościowych CO₂, CO, HC+H₂ (suma węglowodorów lotnych i wodoru), a także H₂S, SO₂ i NO_x w suchych gazach nieoczyszczonych, unoszonych podczas 18-godzinnej szarży grafityzacyjnej przedstawiono na rys. 2. Zawartość wilgoci w tych gazach jest z reguły niska (rzędu 1 %) i częściowo uzależniona od występującej w danym okresie wilgotności powietrza zasysanego z hali Grafitowni.

4. Ocena sprawności instalacji oczyszczania gazów pografityzacyjnych

Badaniami objęto wszystkie etapy cyklu produkcyjnego, w tym całą szarżę grafityzacyjną oraz fazę wentylacji pieca LWG, w okresie gdy gazy pografityzacyjne były odprowadzane do atmosfery poprzez instalację oczyszczania. Większość pomiarów wykonano podczas dwóch 18-godzinnych szarż grafityzacyjnych prowadzonych w piecu LWG nr 4 o identycznych parametrach wsadowych (60 elektrod $\phi 600 \times 2530$ mm oraz 39 elektrod $\phi 500 \times 1950$ mm o łącznej masie: 81,8+29,1=110,9 Mg). W charakterze zasypki izolacyjnej stosowany był regenerat w postaci mieszaniny kokсів metalurgicznego i z węgla brunatnego w stosunku 2:3 (ok. 240 ton) oraz mieszanina kokсів metalurgicznego i z węgla brunatnego w stosunku 4:3 (ok. 30 ton), przy czym podczas drugiego z badanych cykli produkcyjnych zastosowano nową zasypkę izolacyjną.

Ocena skuteczności działania instalacji oczyszczania gazów pografityzacyjnych dokonana została na podstawie serii pomiarów stężeń i strumieni masy wybranych substancji w gazach odlotowych przeprowadzonych równolegle lub prawie równolegle w punktach pomiarowych położonych przed i za

poszczególnymi węzłami oczyszczania (rys. 1) [3]. Z uwagi na istnienie w układzie odprowadzenia gazów odlotowych nieszczelności oraz licznych by-passów z nie do końca domkniętymi przepustnicami (również pomiędzy kolejnymi punktami pomiarowymi), ocena ta była znacznie utrudniona, co wynikało głównie z niebilansowania się strumieni objętości gazów przechodzących przez poszczególne przekroje pomiarowe. Skutkowało to tym, że skuteczność działania badanych instalacji oczyszczania została określona w sposób przybliżony w oparciu o zmiany stężeń wybranych składników w oczyszczanych gazach.



Rys. 2. Przykładowy przebieg zmienności stężeń objętościowych wybranych składników gazów unoszonych z procesu grafityzacji elektrod w piecu LWG:
a) CO_2 , CO i $\text{HC}+\text{H}_2$, b) SO_2 , H_2S i NO_x ($\text{NO}+\text{NO}_2$)

4.1. Instalacja dopalania katalitycznego

Skuteczność utleniania wybranych składników gazów pografitacyjnych w instalacji dopalania katalitycznego oceniona została poprzez porównanie wyników pomiarów przeprowadzonych w punktach pomiarowych położonych przed (G-ZA/R-P) i za (R-ZA/S-ZA) instalacją. W tablicy 1 zamieszczono

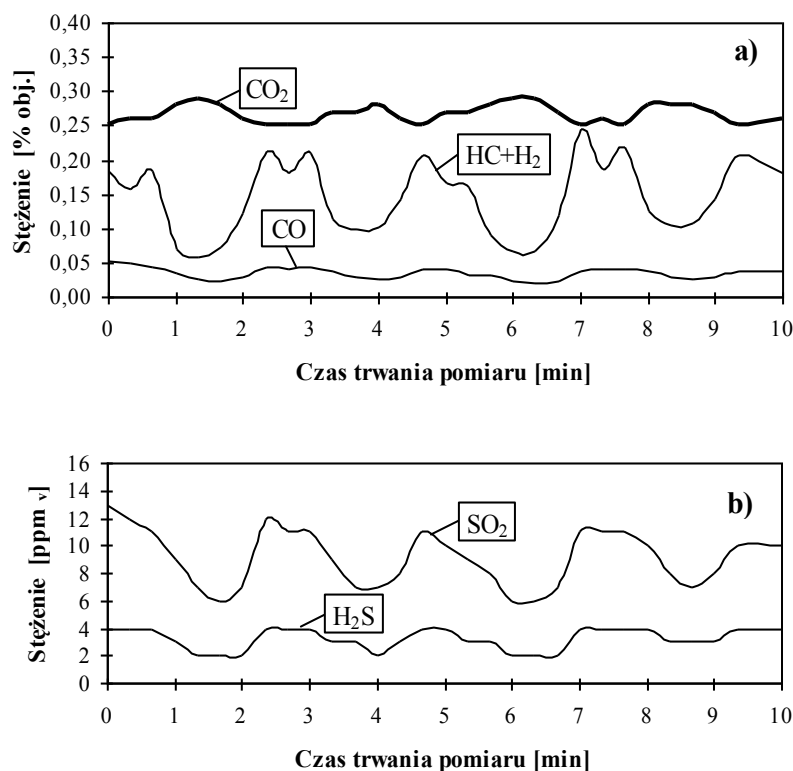
zbiorcze zestawienie redukcji stężeń CO, HC+H₂, H₂S, CS₂ i SO₂ w gazach odlotowych po przejściu przez instalację dopalania katalitycznego, uzyskanych w wyniku przeprowadzonych od kilku (w przypadku CS₂) do kilkunastu serii pomiarowych (10÷20-minutowych), mających miejsce pomiędzy 5. a 18. godziną szarży grafityzacyjnej. W tym czasie stężenia większości dopalanych składników po uzyskaniu maksimum wykazywały trend malejący. Jedynie w przypadku stężeń CS₂ wyraźny trend malejący obserwowany był dopiero po ok. 13÷15 godzinach, licząc od początku cyklu produkcyjnego. W zestawieniu ujęto także SO₂, gdyż końcowym produktem utleniania związków siarki był prawdopodobnie SO₃.

Skuteczność utleniania analizowanych substancji w instalacji dopalania katalitycznego z reguły malała wraz ze zmniejszaniem się ich stężeń w gazach wprowadzanych do instalacji, a podane w tablicy 1 wartości średnie odpowiadały przeważnie następującym stężeniom w suchych gazach wlotowych: CO – ok. 5÷7 g/Nm³, HC+H₂ – ok. 0,8÷1,1 % obj., H₂S – ok. 18÷20 mg/Nm³, CS₂ – ok. 4÷5 mg/Nm³, SO₂ – ok. 80÷100 mg/Nm³. Zdarzało się jednak, że w fazie wentylacji pieca LWG przez instalację dopalania, przy zdecydowanie niższych stężeniach wlotowych, chwilowa skuteczność utleniania tych związków była wyższa niż w fazie grafityzacji.

Tablica 1. Redukcja stężeń wybranych substancji w gazach pografityzacyjnych po przejściu przez instalację dopalania katalitycznego

Wartość	Redukcja stężenia [%]				
	CO	HC+H ₂	H ₂ S	CS ₂	SO ₂
minimalna	76	44	68	2	43
maksymalna	95	100	84	82	83
średnia	85	72	76	43	72

Spośród lotnych związków organicznych w miarę wysoką skuteczność dopalania uzyskano jedynie dla etylenu i ksylenów. W znacznie mniejszym stopniu badana instalacja powodowała utlenianie etanu, propanu, toluenu, etylobenzenu, a zwłaszcza metanu. W przypadku benzenu okresowo obserwowany był nawet efekt odwrotny – wzrost stężeń po przejściu gazów pografityzacyjnych przez instalację dopalania katalitycznego. Podobne zjawisko występowało także w przypadku niektórych wyższych związków aromatycznych i skutkowało m.in. zmianą struktury wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych (WWA). Zbyt mała liczba pomiarów przeprowadzonych równoległe przed i za tą instalacją, a czasem także zbyt niski poziom stężeń niektórych badanych substancji, nie pozwalają jednak na podanie w tym zakresie wiarygodnych danych ilościowych. Każdy z trzech pracujących reaktorów cechował się ponadto różną sprawnością w poszczególnych fazach wynikających z rewersyjnego charakteru przepływu gazów, co skutkowało znacznym nieraz wahaniem się chwilowych stężeń dopalanych składników gazów pografityzacyjnych w kolektorze zbiorczym za instalacją (rys. 3.).



Rys. 3. Fragment przebiegu zmienności stężeń objętościowych wybranych składników gazów pografityzacyjnych za instalacją dopalania katalitycznego (siódma godzina szarży grafityzacyjnej): a) CO₂, CO i HC+H₂, b) SO₂ i H₂S

4.2. Instalacja oczyszczania mokrego

Na podstawie wyników pomiarów przeprowadzonych przed i za mokrym węzłem oczyszczania gazów pografityzacyjnych nie można było jednoznacznie stwierdzić, jaka jest jej całkowita skuteczność działania w zakresie odsiarczania gazów pografityzacyjnych, gdyż badaniami nie objęto trójtlenku siarki, który był prawdopodobnie głównym produktem utleniania związków siarki po ich przejściu przez instalację dopalania katalitycznego. Sam dwutlenek siarki, z uwagi na jego niskie stężenia w gazach wprowadzanych do absorbera (rzędu 10÷60 mg/Nm³), zatrzymywany był ze sprawnością nie przekraczającą 65 % (średnia skuteczność: ok. 33 %). Redukcja stężeń H₂S i CS₂ w oczyszczanych gazach po przejściu przez skrubler również ma miejsce i waha się od ok. 10 do 60 %. Zakładając co najmniej 99 %-ową skuteczność absorpcji trójtlenku siarki w mokrym węźle oczyszczania, całkowitą skuteczność odsiarczania ga-

zów odlotowych (oczyszczania gazów z siarki występującej w różnych związkach) można oszacować na poziomie ponad 80 %.

Instalacja mokra usuwa również z gazów pografitizacyjnych większość amoniaku (ze skutecznością ponad 95 %, przy stężeniach w gazach na wlocie powyżej $0,2 \text{ mg/Nm}^3$) oraz część związków organicznych, w tym węglowodórów aromatycznych występujących zarówno w fazie gazowej (np. benzen, toluen czy ksyleny), jak i stałej (np. WWA). Związki aromatyczne w gazach pografitizacyjnych występują jednak w niedużych stężeniach, zwykle poniżej $1,3 \text{ mg/Nm}^3$ w przypadku łącznej zawartości benzenu i jego homologów z nasyconym łańcuchem bocznym (BTX), poniżej $1,0 \text{ mg/Nm}^3$ w przypadku substancji smołowych ogółem oraz poniżej $20 \text{ }\mu\text{g/Nm}^3$ w przypadku sumy 16 podstawowych WWA. Skuteczność odpylania samego skrubera nie była badana. Zgodnie z założeniami projektowymi powinna ona wynosić ok. 88 %, choć przy małych stężeniach pyłu w gazach wprowadzanych do instalacji (rzędu kilku mg/Nm^3) będzie ona raczej dużo niższa.

4.3. Cały system oczyszczania

Skuteczność działania całego systemu oczyszczania gazów odlotowych z procesu grafityzacji elektrod węglowych w piecu LWG oceniona została w oparciu o porównanie stężeń i strumieni masy wybranych substancji w gazach wchodzących na instalację dopalania katalitycznego oraz odprowadzanych do powietrza (odpowiednio punkty R-ZA i G-4). Niestety przez jedyny dostępny w gazach nieoczyszczonych przekrój pomiarowy R-ZA, w którym można było wykonać pomiary strumienia objętości gazów, nie przechodzi całość gazów odprowadzanych z pieców LWG (by-pass doprowadzający gazy bezpośrednio do czopucha komina), a z drugiej strony nie cały strumień gazów przechodzący przez ten przekrój kierowany jest do instalacji oczyszczania (by-passy omijające obydwie instalacje lub tylko jedną z nich). A zatem bardziej racjonalne jest tutaj porównanie stężeń niż strumieni masy. Wyniki tego porównania uzyskane dla jednej z badanych szarż grafityzacyjnych zestawiono w tablicy 2.

Tablica 2. Zmiany średnich stężeń wybranych substancji w gazach pografityzacyjnych w punkcie G-4 w stosunku do punktu G-ZA/R-P otrzymanych dla jednej z 18-godzinnych szarż grafityzacyjnych

Redukcja stężenia (% redukcji)			Wzrost stężenia (% wzrostu)
CO (86 %)	H ₂ S (75 %)	HC+H ₂ (64 %)	Pył ogółem (37 %)
SO ₂ (75 %)	CS ₂ (72 %)	NH ₃ (> 93 %)	Substancje smołowe (345 %)
BTX – razem (12 %)			Suma 16 WWA (179 %)
w tym: benzen (19 %)			
toluen + etylobenzen (8 %)			
ksyleny (7 %)			

Podane w tablicy 2 dane dotyczą cyklu produkcyjnego, w którym zastosowana została nowa (świeża) zasypka izolacyjna. Zaobserwowany wzrost średnich stężeń pyłu ogółem, pomijając błąd pomiarowy, (który może być znaczny z uwagi na jego niskie stężenia, rzędu kilku-kilkunastu mg/Nm³), wynika zapewne z porywania części zawiesiny posorpcyjnej powstającej w skruberze, a po części także z prawdopodobnego tworzenia się pyłów kondensacyjnych z węglowodorów wyższych za instalacją dopalania katalitycznego. W instalacji tej związki organiczne mogą się, bowiem przegrupowywać, łączyć w większe łańcuchy, jak również zmieniać podstawniki (np. w miejsce atomu wodoru przyłączać atom tlenu), co w rezultacie może skutkować zwiększeniem się ich masy cząsteczkowej i stężeń w gazach odlotowych. Wprawdzie nie zawsze obserwowany był wzrost całkowitego ładunku WWA w gazach pografityzacyjnych po ich przejściu przez instalację dopalania, ale zawsze występowała zmiana ich struktury (zawartości poszczególnych WWA). Należy tutaj zaznaczyć, że w punkcie G-4 rejestrowane były także dodatkowe ładunki zanieczyszczeń wynikające z wprowadzania do komina znacznego strumienia nieoczyszczonych gazów pografityzacyjnych bezpośrednio z pieca LWG. W ten sposób ostateczny efekt oczyszczania gazów odlotowych jest mniejszy niż wynikałoby to z łącznego działania obydwu zastosowanych instalacji oczyszczających.

5. Podsumowanie

Podsumowując przeprowadzone analizy można stwierdzić, że oceniany dwustopniowy system oczyszczania gazów odlotowych z procesu grafityzacji elektrod węglowych w SGL Carbon S.A. w miarę dobrze spełnia swoją rolę w zakresie utleniania CO, H₂S, H₂ oraz niektórych lotnych związków organicznych oraz ostatecznego usuwania tlenków siarki i amoniaku, choć stężenia tych ostatnich w gazach wprowadzanych do mokrego wężła oczyszczania są stosunkowo niskie. Z uwagi na istnienie w układzie odprowadzenia gazów odlotowych licznych by-passów (z nie do końca domkniętymi przepustnicami), część gazów pografityzacyjnych omija obydwie instalacje oczyszczania lub jedną z nich, przez co do atmosfery wprowadzane są także strumienie gazów nieo-

czyszczonych, a łączny efekt działania instalacji oczyszczania jest często znacznie osłabiany. Niepożądanym efektem działania instalacji dopalania katalitycznego wydaje się być zachodzące prawdopodobnie w jej obrębie przegrupowywanie i/lub tworzenie wyższych węglowodorów aromatycznych, które tylko częściowo są usuwane w mokrym węźle oczyszczania.

Literatura

1. Mazur M., Westfal M., Sadowska-Janusz D., Lipowski J.: Problemy emisji zanieczyszczeń z procesu grafityzacji elektrod. *Ochrona Powietrza* 1990, nr 6.
2. Mazur M.: Emisja związków siarki z procesów hutnictwa żelaza. Seria: Rozprawy Monografie nr 37. Wyd. AGH, Kraków 1995.
3. Mazur M. i inni: Ocena wielkości emisji zanieczyszczeń ze zmodernizowanej Grafitowni SGL Carbon S.A. w Nowym Sączu. Zakład Kształtowania i Ochrony Środowiska AGH. Kraków, styczeń 2003. Praca niepublikowana.

Przeprowadzone badania i analizy sfinansowane zostały przez SGL Carbon S.A. oraz przez KBN (umowa nr 11.11.150.171).