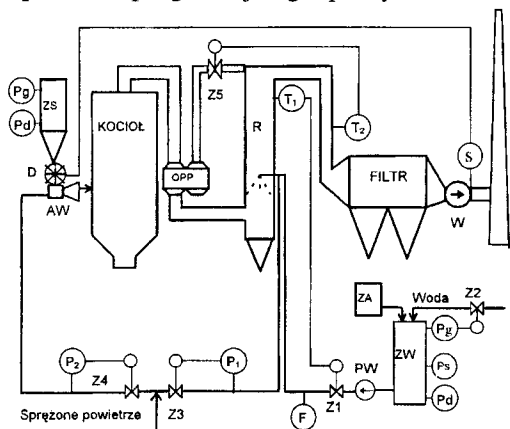


Mieczysław Adam Gostomczyk

## Koszty ograniczania emisji SO<sub>2</sub> z kotłów pyłowych metodą WAWO na podstawie badań eksploatacyjnych

### Opis metody WAWO

Prowadzone w Zespole Elektrociepłowni Wrocław SA w latach 1991–1995 badania eksploatacyjne w skali pełno-przemysłowej na instalacjach do ograniczania emisji SO<sub>2</sub> z kotłów WP-120 i WP-70 pozwoliły na uzyskanie wszystkich niezbędnych informacji do określenia kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych metody WAWO. Opracowano też cztery warianty technologiczne metody WAWO, charakteryzujące się możliwością dostosowania urządzeń ograniczających emisję SO<sub>2</sub>, zarówno do obecnie obowiązujących, jak i przewidywanych w 2010 r. norm emisji SO<sub>2</sub>. Prowadzone są też próby modyfikacji metody WAWO w taki sposób, aby można było jednocześnie ograniczać emisję tlenków azotu w stopniu umożliwiającym zachowanie dopuszczalnych norm emisji NO<sub>2</sub>. Opracowanie procesu w skali pełno-przemysłowej (instalacje referencyjne na kotłach o mocy 140 MW<sub>t</sub> i 80 MW<sub>t</sub>) umożliwiło sprzedaż technologii Fabryce Kotłów RAFAKO na podstawie umowy licencyjnej z listopada 1995 r. Zabezpieczono też pełną ochronę patentową technologii w wyniku uzyskania 5 patentów [1–5]. Zasada metody WAWO była wielokrotnie publikowana [6–8]. Proces ograniczania emisji SO<sub>2</sub> jest dwustopniowy, zaś zasadę procesu ilustruje rysunek 1, na którym wyróżnić można obieg spalin, układ podawania sorbentu, układ dozowania wody wzbogaconej addytywem, przewody rozprzewadzenia sprężonego powietrza i kanał powietrza podgrzewającego spaliny.



Rys. 1. Schemat technologiczny instalacji [8] (Z1–Z5 – zawory regulacyjne, P – ciśnienie, ZW – zbiornik wody, F – przepływ wody, ZS – zasobnik Ca(OH)<sub>2</sub>, S – stężenie SO<sub>2</sub>, D – dozownik, T – temperatura, R – reaktor, P<sub>g</sub> – poziom górny, OPP – podgrzewacz powietrza, P<sub>s</sub> – poziom pośredni, W – wentylator, P<sub>d</sub> – poziom dolny, PW – pompa wody, AW – aparat wydmuchowy, ZA – zbiornik addytywu)

Spaliny opuszczając kocioł przepływają kolejno przez obrotowy podgrzewacz powietrza (OPP), reaktor (R), filtr, wentylator ciągu (W) i następnie są emitowane do atmosfery przez komin. Na tej drodze następują kolejne fazy ich oczyszczania. Sorbent w postaci suchego Ca(OH)<sub>2</sub> jest wdmuchiwany układem dysz do kotła nad strefę spalania i wraz ze spalinami jest transportowany do reaktora. Jest to etap oczyszczania polegający na chemisorpcji i adsorpcji SO<sub>2</sub> na powierzchni ziaren popiołu i wapna. W reaktorze spaliny są zraszane wodą, wzbogaconą addytywem podawanym ze zbiornika (ZA), rozpylaną przez system dysz pneumatycznych, dzięki czemu zachodzi cały szereg zjawisk fizyczno-chemicznych, m.in. spaliny ulegają stopniowemu schłodzeniu i nawilżeniu, co powoduje aktywację sorbentu i znacznie wzmacnia proces wiązania SO<sub>2</sub>. Rozpylana w reaktorze woda w całości odparowuje. Przed filtrem spaliny są ogrzewane strumieniem gorącego powietrza z podgrzewacza obrotowego, co powoduje wysuszenie pyłu, obniżenie wilgotności względnej spalin i chroni filtr przed wykraplaniem się wody. W filtrze wychwytywany jest popiół wraz z produktami sorpcji i pozostałym sorbentem.

Układ podawania sorbentu składa się z zasobnika (ZS), dozownika (D) i aparatu wydmuchowego (AW). Z zasobnika wapno grawitacyjnie wpada do dozownika pozwalającego na płynną regulację wydajności. Aparat wydmuchowy pozwala transportem pneumatycznym podawać wapno do kotła. Tak ze względów eksploatacyjnych jak i procesowych korzystne jest aby powietrze transportujące było odolejone i pozbawione wilgoci. W przypadku kiedy nie ma technicznych możliwości umieszczenia w bezpośrednim sąsiedztwie kotła zasobnika zapewniającego zapas sorbentu, przynajmniej na kilka dni eksploatacji instalacji, należy wybudować dodatkowy zbiornik magazynowy, z którego zasobnik będzie cyklicznie napełniany sorbentem z wykorzystaniem transportu pneumatycznego.

W skład układu dozowania cieczy wchodzi: zawór odcinający (Z2), zbiornik wody (ZW), zbiornik addytywu (ZA), pompa (PW), zawór regulacyjny (Z1) i dysze rozpyłowe. Zbiornik wody niezbędny jest ze względu na duże wahania ciśnienia występujące zwykle w zakładowej sieci wodociągowej. Ma on więc działanie buforujące, a dodatkowo podwyższa niezawodność instalacji, gdyż zgromadzona w nim woda jest wykorzystywana w czasie krótkotrwałych awarii sieci zakładowej. W przypadku stosowania wody przemysłowej zanieczyszczonej zawiesinami należy zbudować przed zbiornikiem odmulacz, co zabezpieczy rurociągi i armaturę przed zatykaniem się.

Na przewodach sprężonego powietrza zbudowane są zawory regulacyjne stabilizujące jego ciśnienie. Zbudowane są

dwa zawory regulacyjne (Z3 i Z4), ponieważ różne ciśnienia są wymagane dla dysz rozpyłowych i aparatów wydmuchowych. Rurociąg doprowadzający powietrze do aparatów wydmuchowych powinien być wyposażony w urządzenia do jego uzdatniania.

Ostatnim wyszczególnionym elementem całego układu jest kanał umożliwiający doprowadzenie gorącego powietrza z obrotowego podgrzewacza do spalin opuszczających reaktor. Przepływ powietrza następuje na skutek różnicy ciśnień w obrotowym podgrzewaczu powietrza (OPP) i reaktorze (R), dlatego wyposażony jest on jedynie w przepustnicę umożliwiającą płynną regulację przepływu.

Zaletą instalacji WAWO jest niewielka ingerencja w urządzenie kotła. Układy dozowania sorbentu, dozowania wody i podgrzewania spalin są urządzeniami zewnętrznymi i w przypadku ich awarii kocioł może być normalnie eksploatowany. Jedyną poważną ingerencją jest zabudowa reaktora. Nie powoduje to jednak utrudnień w eksploatacji kotła, gdyż w praktyce jest to poszerzony i rozbudowany kanał spalin.

Przeprowadzone pomiary wykazały, że instalacja odsiarczania spalin nie wpływa na sprawność kotła.

## Koszty ograniczania emisji SO<sub>2</sub>

Instalacje WAWO dla kotłów WP-120 i WP-70 zostały wybudowane przez ZEC Wrocław SA w oparciu o własną technologię. Całkowite koszty inwestycyjne instalacji dla kotłów KW-3 i WP-120 wyniosły 3.750.000 zł, zaś dla kotłów KW-2 i WP-70 – 2.175.000 zł.

Prowadzone badania eksploatacyjne miały też na celu określenie bezpośrednich kosztów eksploatacyjnych, w zależności od wielu zmiennych.

W tabeli 1 zebrano koszty eksploatacyjne ograniczania emisji SO<sub>2</sub> z kotła WP-120 (140 MW<sub>t</sub>) przy spalaniu węgla w ilości średnio 30 t/h, zawierającego 0,907% siarki palnej i wartości opałowej 0,022 GJ/kg. Przy ograniczaniu emisji SO<sub>2</sub> ze skutecznością 50% sorbentem ciekłym była woda z mokrego transportu żużla i popiołu o pH=11+12, zawierająca rozpuszczalne sole wapnia, magnezu, sodu i potasu. Pojemność sorpcyjna tego sorbentu wynosiła około 8+12 kgSO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>. Wzrost skuteczności ograniczania emisji SO<sub>2</sub> z 50% do 90% osiągnąć był przez wzrost pojemności sorpcyjnej w wyniku dodawania do wody po mokrym transporcie soli wapnia i sodu. W tabeli 2 zebrano informacje dotyczące kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych instalacji WAWO na różnych kotłach w sposób umożliwiający porównanie z innymi metodami.

## Wnioski

◆ Przeprowadzone w skali pełnoprzemysłowej badania instalacji WAWO na kotle WP-120 potwierdziły możliwość uzyskiwania skuteczności ograniczania emisji SO<sub>2</sub> w zakresie od 50 do 90% (412+82 gSO<sub>2</sub>/GJ), przy stałym koszcie inwestycyjnym równym 3.750.000 zł (26,8 zł/kW). Stwierdzono też wzrost skuteczności odpylania w elektrofiltrze z 96% do 98%.

◆ Koszty eksploatacyjne w znacznym stopniu zależą od uregulowań prawnych, czyli od wartości emisji dopuszczal-

Tabela 1. Koszty eksploatacyjne emisji SO<sub>2</sub> z kotła WP-120 w ZEC Wrocław SA w zależności od skuteczności usuwania SO<sub>2</sub>

Skuteczność usuwania SO <sub>2</sub>	Masa usuwanego SO <sub>2</sub>	Stężenie SO <sub>2</sub> w spalinach oczyszczonych		Koszt sorbentu suchego	Koszt sorbentu ciekłego	Koszt wody, energii i obsługi	Koszt usunięcia 1 kg SO <sub>2</sub>		Całkowite koszty eksploatacyjne w czasie 6 tys. h/a	Wzrost kosztów rocznych
		mgSO <sub>2</sub> /Nm <sup>3</sup> 6% O <sub>2</sub>	gSO <sub>2</sub> /GJ				średni zł	wzrost kosztów*		
%	kg/h			zł/h	zł/h	zł/h			zł/a	zł/a %
50	272	907	412	195	–	25,72	0,81	–	1.321.920	–
60	326,4	725	330	195	108,8	30,72	1,02	2,09	2.007.360	685.440 51,85
70	380,8	544	247	195	217,6	40,72	1,19	2,14	2.718.912	1.396.992 105,68
80	435,2	363	165	195	326,4	60,72	1,34	2,21	3.499.008	2.177.088 164,69
90	489,6	181	82	195	435,2	100,72	1,49	2,35	4.377.024	3.055.104 231,11

\* wzrost kosztów na każde 10% zwiększenia skuteczności usuwania SO<sub>2</sub>

Tabela 2. Koszty inwestycyjne i eksploatacyjne instalacji WAWO na różnych kotłach (czas pracy kotła 6 tys. h/a, zawartość siarki palnej w węglu 0,907%)

Typ kotła	Koszty inwestycyjne		Koszty eksploatacyjne zł/a		Koszt usunięcia 1 tony SO <sub>2</sub> USD/t Es <sub>02</sub> = 70%
	całkowite, zł	zł/MW	Es <sub>02</sub> = 50%	Es <sub>02</sub> = 70%	
WP-70	2.175.000	27.188	755.383	1.553.664	493
WP-120	3.750.000	26.786	1.321.920	2.718.912	476
OP-130	2.664.900	27.000	931.954	2.354.001	482
OP-206	4.012.800	26.400	1.435.227	2.951.962	471
OP-430	6.380.00	20.126	2.993.205	6.156.394	462
OP-650	7.680.00	16.000	4.532.297	9.321.984	453
OP-1150	11.900.000	14.000	8.025.943	16.507.680	435

Tabela 3. Lista priorytetów inwestycyjnych w energetyce zawodowej w zakresie budowy instalacji odsiarczania spalin

Objekt	Emisja SO <sub>2</sub> bez instalacji odsiarczania spalin	Emisja SO <sub>2</sub> po wybudowaniu instalacji do odsiarczania spalin	Efekt obniżenia emisji SO <sub>2</sub>	Koszt usunięcia SO <sub>2</sub>	Wzrost kosztów produkcji energii elektrycznej	Wzrost kosztów produkcji energii elektrycznej
	t/a	t/a	t/a	USD/t	USD/kWh	%
Bełchatów	328.708	136.965	191.743	686	0,47	25
Jaworzno II	94.339	40.034	54.305	670	0,45	18
Rybnik I 4× 200	48.702	14.611	34.092	473	0,29	12
Turów	152.599	16.991	135.608	564	0,73	34
Połaniec I 4× 200	49.954	8.200	41.753	880	0,64	24
Rybnik II 4× 200	47.210	14.163	33.047	488	0,30	12
Połaniec II 4× 200	49.954	8.200	41.753	880	0,64	24
Łaziska II 4× 200	48.512	7.700	40.811	901	0,68	22
Kozienice 2× 500	51.729	7.765	43.964	925	0,77	22
Dolna Odra I 4× 200	47.527	7.758	39.768	928	0,66	23
Dolna Odra II 4× 200	47.527	7.758	39.768	928	0,66	23
Kozienice 5× 200	48.189	8.206	39.983	1.181	0,84	22
Ostrołęka	30.487	5.297	25.189	1.103	0,82	29
Łaziska I 2× 120	9.499	1.651	7.848	1.554	1,15	35

nej. Całkowite koszty eksploatacyjne instalacji pracującej przez 6 tys.h/a ze skutecznością 50% wynoszą 1.321.920 zł (0,81 zł/kgSO<sub>2</sub>), a przy skuteczności 90% – 4.377.024 zł (1,49 zł/kgSO<sub>2</sub>). Wzrost kosztów wynosi około 231%.

♦ Zastosowany w instalacji WAWO układ automatycznego sterowania dozowania sorbentu, w zależności od emisji dopuszczalnej, umożliwia minimalizację kosztów eksploatacyjnych przez dostosowanie zużycia sorbentu do zmiennych warunków eksploatacji kotła.

♦ Podstawowym wskaźnikiem kosztów eksploatacyjnych jest koszt usunięcia 1 tony SO<sub>2</sub>. W tabeli 3 porównywalne koszty usuwania SO<sub>2</sub> [9] przewidywane są tylko dla Elektrowni Rybnik, gdzie stosuje się podobną do WAWO technologię ograniczania emisji SO<sub>2</sub> (473 USD/tSO<sub>2</sub>).

#### LITERATURA

1. M.A. GOSTOMCZYK i in.: Sposób i urządzenie do podawania związków wapnia do kotła. Patent PL nr 164835, 1994.

- M.A. GOSTOMCZYK i in.: Urządzenie do wytwarzania i podawania mieszaniny wodno-powietrznej do reaktora. Patent PL nr 167472, 1995.
- M.A. GOSTOMCZYK i in.: Reaktor do oczyszczania gazów spalinowych z gazowych związków siarki. Patent PL nr 290097 P, 1995.
- M.A. GOSTOMCZYK i in.: Sposób oczyszczania gazów spalinowych z gazowych związków siarki. Patent PL nr 296213 P, 1995.
- M.A. GOSTOMCZYK i in.: Sposób usuwania dwutlenku siarki z gorących gazów spalinowych. Patent PL nr 296392 P, 1995.
- M.A. GOSTOMCZYK, J. SIECZKOWSKI: Oczyszczanie spalin z kotłów pyłowych metodą WAWO. Mat. konf. Ograniczenie zanieczyszczeń z urządzeń energetycznych. PZITS, Poznań 1995.
- M.A. GOSTOMCZYK i in.: Suche metody ograniczania emisji SO<sub>2</sub>. Mat. konf. Ograniczenie emisji zanieczyszczeń z kotłów rusztowych i pyłowych. ODITK, Sopot 1996.
- G. ŻUREK: Sterowanie i kontrola procesu w technologii WAWO ograniczania emisji SO<sub>2</sub> z kotłów pyłowych. Mat. konf. „Ograniczenie emisji zanieczyszczeń z kotłów rusztowych i pyłowych”. ODITK, Sopot 1996.
- Program redukcji SO<sub>2</sub> w energetyce zawodowej. Praca zbiorowa. Polskie Towarzystwo Elektrociepłowni Zawodowych, Warszawa 1995.

### Cost Analysis of Abating SO<sub>2</sub> Emissions from Boiler Rooms by the WAWO Method

The WAWO system for the abatement of SO<sub>2</sub> emission from WP-120 and WP-70 boilers has been operated by the Thermal-Electric Station of Wrocław since 1991. A full-scale study of the installation (which covered the period of 1991–1995) allowed a reliable analysis of capital and operating costs. Thus, the capital cost of a WAWO system amounted to 1,400,000 USD and 800,000 USD for a 140-MW boiler and an 80-MW boiler, respectively. Operating costs increased noticeably with the increasing efficiency of emission control, amounting to

0.30 USD/kgSO<sub>2</sub> and 0.55 USD/kgSO<sub>2</sub> at 50% efficiency and 90% efficiency, respectively. The increment of annual operating costs at the adopted service time of 6,000 h/a was markedly higher, ranging from 490,000 USD for the efficiency of 50% to 1,620,000 USD for the efficiency of 90%. Owing to an appropriate system of automatic control, the WAWO installation enables the operating costs to be minimized according to the already signed Second Sulphur Protocol allowing variable admissible SO<sub>2</sub> emissions in certain periods.