

Michał Głomba

Zastosowanie wypełnienia pierścieniowego I-15M do odpylania spalin z suszarni koncentratu flotacyjnego węgla kamiennego

Koncentrat flotacyjny powstaje w procesie wzbogacania węgla kamiennego. Ostatnim etapem tego procesu jest suszenie koncentratu w suszarkach bębnowych, do których wprowadza się gorące spaliny wytwarzane w palenisku węglowym lub gazowym. Opuszczając suszarkę spaliny odpyla się wstępnie w baterii cyklonów ze skutecznością 93+96 %. Po pierwszym stopniu odpylania stężenie pyłu w spalinach wynosi $4+6 \text{ g/m}^3$. Nie wydzielone w cyklonach cząstki usuwa się w drugim stopniu odpylania, który w krajowych kopalniach stanowi wieża ze zraszana warstwą wypełnienia stacjonarnego, utworzoną z pierścieni Raschiga. Niekiedy zamiast zraszanej wieży z wypełnieniem stosuje się niskociśnieniową zwężkę Venturiego typu Airmix. Charakterystykę techniczną urządzeń badanego zespołu suszarniczego (typ i wielkość suszarki, baterii cyklonów i odpylacza mokrego w postaci wieży z wypełnieniem) zawarto w pracy [1], w której podano również wyniki badań skuteczności odpylania spalin suszarniczych w baterii cyklonów i w wieży ze zraszana warstwą pierścieni Raschiga. Badania przeprowadzone w Politechnice Wrocławskiej [2] dowiodły, iż całkowita skuteczność odpylania spalin jest niewystarczająca, a emisja pyłu do powietrza atmosferycznego znacznie przekracza ustaloną na $16,0 \text{ kg/h}$ wartość emisji dopuszczalnej. Na podstawie wyników badań opracowano program modernizacji drugiego stopnia odpylania, która miała zapewnić obniżenie emisji pyłu ze $155,0$ do co najwyżej $16,0 \text{ kg/h}$.

W niniejszej pracy omówiono zakres przeprowadzonej modernizacji oraz wyniki badań skuteczności pracy drugiego stopnia odpylania spalin suszarniczych. Przedstawiono frakcyjne skuteczności odpylania uzyskane podczas oczyszczania spalin w warstwie wypełnienia usypanego z polietylenowych elementów pierścieniowych typu I-15M.

Zakres modernizacji drugiego stopnia odpylania spalin

Z analizy efektów pracy pierwszego stopnia odpylania spalin wynikało, iż obecne baterie cyklonów wykazują zadowalającą skuteczność. Istniały natomiast możliwości zwiększenia skuteczności odpylania w drugim stopniu instalacji. Wieża, z wypełnieniem pierścieniowym Raschiga zraszana wodą, obniżała emisję pyłu tylko o 60,4 %. Aby uzyskać emisję pyłu mniejszą od dopuszczalnej, drugi stopień instalacji powinien pracować ze skutecznością co najmniej 97 % [2], którą można było zapewnić poprzez:

- zmianę wypełnienia pierścieniowego Raschiga na wypełnienie lżejsze, o większej porowatości i powierzchni właściwej oraz mniejszej chropowatości materiału konstrukcyjnego,
- zmianę przeciwwądownego przepływu faz na przepływ krzyżowy, eliminujący efekt zalewania warstwy wypełnienia,
- zwiększenie gęstości zraszania warstwy wypełnienia,
- podział warstwy wypełnienia na warstwę wstępną i zasadniczą,
- zastosowanie, w miejsce rozpylaczy wirowych, rozpylaczy formujących strugę rozpylonej wody w tak zwany pełny stożek, co powinno zwiększyć jednorodność gęstości zraszania w całym przekroju warstwy.

Pierścienie Raschiga zastąpiono elementami wypełnienia typu I-15M, wykonanymi z polietylenu [3]. Charakterystykę techniczną tych elementów przedstawiono w tabeli 1. Do rozpylania wody w wieży zastosowano rozpylacze strumieniowe typu RSW 8 [4], których ważniejsze parametry podano w tabeli 2.

Tabela 1. Charakterystyka wypełnienia I-15M (usypanego)

Parametr techniczny	Jednostka	Symbol	Wartość
Średnica elementu	mm	d	50
Wysokość elementu	mm	h	42
Grubość ścianek elementu	mm	g	1,8
Powierzchnia właściwa	m^2/m^3	a	142,2
Porowatość	m^3/m^3	ϵ	0,865
Średnica hydrauliczna wolnej przestrzeni	mm	d_h^*	24,3
Średnica zastępcza elementu	mm	d_z^{**}	5,684
Średnica zastępcza elementu, równoważna średnicy kuli o takiej samej objętości jak element	mm	d_r^{***}	30,576
Liczba elementów w 1 m^3 wypełnienia usypanego	szt/ m^3	n	9.025
Gęstość usypowa wypełnienia:			
– polietylenowego	kg/m^3	ρ_u	129,6
– polipropylenowego	kg/m^3	ρ_u	121,5

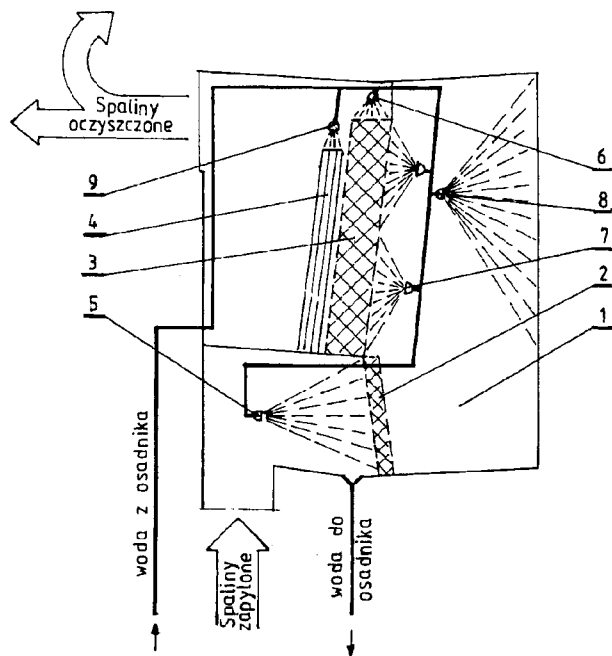
* zdefiniowano jako $d_h=4\epsilon/a$

** zdefiniowano jako $d_z=6(1-\epsilon)/a$

*** zdefiniowano jako $d_r=d_z\phi$, gdzie ϕ – sferyczność elementu wypełnienia (odwrotność współczynnika kształtu)

Tabela 2. Charakterystyka rozpylacza RSW 8 (ciśnienie przed rozpylaczem $\Delta p=0,2 \text{ MPa}$)

Parametr techniczny	Jednostka	Wartość
Wydajność (strumień objętości cieczy)	m^3/h	2,5
Kąt stożka strugi kropeł	grad (rad)	$120 (2\pi/3)$
Średnica kropeł objętościowo-powierzchniowa	mm	0,603



Rys. 1. Schemat drugiego stopnia odpylania spalin suszarniczych (1 – wieża drugiego stopnia odpylania, 2 – wstępna warstwa wypełnienia I-15M, 3 – zasadnicza warstwa wypełnienia I-15M, 4 – odkraplacz żaluzjowy, 5 – rozpylacze rozpylające wodę na wstępną warstwę wypełnienia, 6 – rozpylacze rozpylające czołowo wodę na zasadniczą warstwę wypełnienia, 7 – rozpylacze rozpylające wodę na zasadniczą warstwę wypełnienia od góry, 8 – rozpylacze zraszające ścianę wieży, 9 – rozpylacze zraszające odkraplacz)

Schemat drugiego stopnia odpylania spalin suszarniczych po modernizacji przedstawiono na rysunku 1.

Warstwę wstępną wypełnienia zraszano wodą przy pomocy rozpylaczy czołowo od strony napływu spalin zapyłonych, a także od góry wodą spływającą ze znajdującej się nad nią warstwy zasadniczej. Zasadniczą warstwę wypełnienia zraszano również czołowo oraz od góry. Czołowy natrysk wody miał na celu zmywanie wypełnienia w strefie największego zagrożenia zarastaniem cząstkami wydzielanymi ze spalin. Zraszanie obu warstw wypełnienia od góry pozwalało prowadzić odpylanie w warunkach krzyżowego przepływu spalin względem kierunku spływu wody w wypełnieniu. Taki sposób kontaktu faz charakteryzuje się mniejszym spadkiem ciśnienia spalin niż podczas kontaktu przeciwnoobrotowego oraz mniejszym o około 50 % zapotrzebowaniem na wodę do zraszania wypełnienia [5]. Nie występuje przy tym zjawisko zalewania wypełnienia.

Warstwa wstępna ma na celu schłodzenie i zwilżenie spalin oraz wydzielenie z nich cząstek pyłu o większych średnicach. Schładzanie spalin wpływa na zmniejszenie strumienia ich objętości, a nawilżanie sprzyja aglomeracji cząstek submikronowych i łatwiejszego ich wydzielenia w warstwie zasadniczej wypełnienia. Dodatkowo zraszaniu wodą poddano tę ścianę wieży, przy której zachodziła zmiana kierunku przepływu spalin o kąt 180 stopni. W obecności filmu cieczy na powierzchni ściany, w wyniku działania sił adhezji, zachodzić będzie osadzanie cząstek aerozolowych, przy czym jeżeli grubość warstewki cieczy jest większa od 0,3 mm, to wtórne uniesienie cząstek pyłu strumieniem spalin z warstewki cieczy jest mało prawdopodobne [6].

Za warstwą zasadniczą wypełnienia umieszczono odkraplacz inercyjny, zbudowany z elementów falistych, który w sposób ciągły był zmywany wodą. Charakterystykę techniczną drugiego stopnia odpylania przed i po modernizacji drugiego stopnia odpylania zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3. Charakterystyka techniczna drugiego stopnia odpylania (wieży z wypełnieniem)

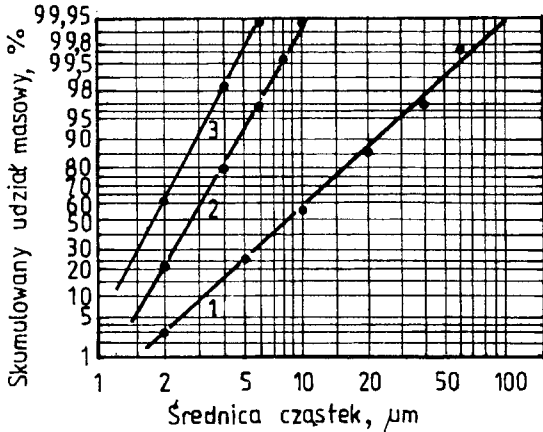
Parametr techniczny	Jednostka	Stan	
		przed modernizacją	po modernizacji
Powierzchnia przekroju przepływowego w płaszczyźnie usytuowania warstwy wypełnienia:			
– wstępnej	m ²	–	8,2
– zasadniczej	m ²	22,6	15,6
Rodzaj wypełnienia (wielkość)		p. ceram. Raschiga (50x50x5 mm)	p. polietyl. I-15M (50x42x1,8 mm)
Grubość warstwy wypełnienia:			
– wstępnej	m	–	0,25
– zasadniczej	m	0,3	0,80
Kierunek napływu spalin na warstwę wypełnienia		pionowy	poziomy
Strumień objętości wody zraszającej warstwę wypełnienia:			
– wstępną	m ³ /h	–	6,8+58,2*
– zasadniczą	m ³ /h	28,5	58,2
Gęstość zraszania warstwy wypełnienia:			
– wstępnej	m ³ /m ² h	–	44,8
– zasadniczej	m ³ /m ² h	1,26	12,5
Typ i wielkość (śr. otw. wyl.) rozpylacza		wir. ką., 4 mm	strum.- wir., 8 mm
Liczba rozpylaczy (zraszanie i zmywanie)	szk.	70	40
Ciśnienie wody przed rozpylaczem	MPa	0,25	0,2
Prędkość spalin w przekroju usytuowania warstwy wypełnienia:			
– wstępnej	m/s	–	2,75
– zasadniczej	m/s	1,0	1,45
Średnia temperatura spalin dla warstwy wypełnienia:			
– wstępnej	K	–	362
– zasadniczej	K	353	338
Opory przepływu spalin w wieży	Pa	500	450

* dotyczy strumienia objętości wody spływającej z warstwy zasadniczej

Po zakończeniu prac modernizacyjnych drugi stopień odpylania spalin poddano badaniom, których wyniki zamieszczono w pracy [2].

Skuteczność odpylania spalin w warstwie wypełnienia I-15M

Badania skuteczności odpylania spalin przeprowadzono dla wstępnej i zasadniczej warstwy wypełnienia. Skład frakcyjny pyłu zawartego w spalinach przed wstępną warstwą wypełnienia I-15M (za baterią cyklonów) i przed warstwą zasadniczą (za warstwą wstępną) oraz w spalinach wprowadzanych do powietrza przedstawiono na rysunku 2.



Fys. 2. Skład frakcyjny cząstek flotokonzentratu węgla kamiennego (1 – przed warstwą wstępną wypełnienia, 2 – przed zasadniczą warstwą wypełnienia, 3 – za zasadniczą warstwą wypełnienia)

Jak z niego wynika, funkcja rozkładu rozmiarów cząstek dpyłu unoszonego z suszarek koncentratu flotacyjnego węgla kamiennego odpowiada rozkładowi logarytmiczno-normalnemu, który oparty jest na rozkładzie Gaussa, a w którym zamiast liniowego wyrażenia d_p wprowadzono $\ln d_p$. Dla wartości skumulowanych funkcję rozkładu logarytmiczno-normalnego określa następująca zależność:

$$F(d_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \ln \sigma_g}} \int_{-\infty}^{\ln d_p / d_{pm}} \exp \left[-\frac{\ln d_p / d_{pm}}{2(\ln \sigma_g)^2} d(\ln d_p) \right]$$

(1)

gdzie:

d_p - średnica cząstki,

d_{pm} - średnica mediana odniesiona do liczby cząstek przy $F=0,5$,

F - funkcja rozkładu liczby cząstek (ułamek skumulowany liczby cząstek o średnicy d_p),

σ_g - geometryczne odchylenie standardowe (wskaźnik rozproszenia wymiarów cząstek).

W celu określenia danych rozkładu σ_g i d_{pm} skorzystano z wykresu w układzie współrzędnych: logarytm średnicy cząstki - prawdopodobieństwo, odpowiadające funkcji błędu w % wartości skumulowanej, zwykle mniejszej od wartości funkcji F . Tę samą postać odchylenia standardowego σ_g ma również funkcja rozkładu masowego X .

Dane uzyskane z analizy granulometrycznej pyłu pobranego ze strumienia spalin za baterią cyklonów oraz za wstępną warstwą

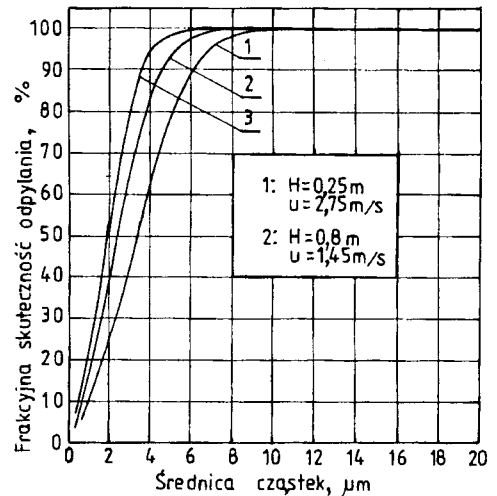
wypełnienia i za warstwą zasadniczą (rys.2) układają się wzdłuż linii prostej, a więc odpowiadają rozkładowi logarytmiczno-normalnemu. Zależności przedstawione na rysunku 2, dla pobranych próbek pyłu, pozwoliły na określenie następujących wartości (tab.4):

- średnica mediana d_{pm} ,
- geometryczne odchylenie standardowe σ_g ,
- maksimum gęstości rozkładu $+\sigma_g d_{pm}$, odpowiadające wartości 84,13 % dla danej średnicy i $-\sigma_g d_{pm}$, odpowiadające wartości 15,87 % (wartości te oznaczono jako d_{p84} i d_{p16}),
- średnica średnia Sautera cząstek d_s (średnica objętościowo-powierzchniowa).

Tabela 4. Wielkości charakteryzujące I-n rozkład cząstek pyłu suszarniczego pobranego w charakterystycznych punktach instalacji odpylającej

Miejsce poboru próbki pyłu	Wielkości charakteryzujące rozkład cząstek pyłu				
	$d_p, \mu m$	$d_{16}, \mu m$	$d_{84}, \mu m$	σ_g	$d_s, \mu m$
Kanał spalinowy za baterią cyklonów	8,65	4,10	18,3	2,11	6,5
Wieża z wypełnieniem - za warstwą wstępną	2,8	1,85	4,2	1,51	2,6
Otwór wylotowy spalin do powietrza atmosferycznego	1,85	1,29	2,65	1,43	1,74

Badania skuteczności odpylania pozwoliły na dokonanie oceny przeprowadzonej modyfikacji wieży z wypełnieniem. Wyniki badań, w postaci zależności frakcyjnej skuteczności odpylania od średnicy cząstek, przedstawiono na rysunku 3.



Fys. 3. Zależność frakcyjnej skuteczności odpylania spalin suszarniczych od średnicy cząstek koncentratu flotacyjnego węgla kamiennego (1 – warstwą wstępną, 2 – warstwą zasadniczą, 3 – drugi stopień odpylania w całości)

Krzywa 1 na tym rysunku dotyczy skuteczności frakcyjnej odpylania w warstwie wstępnej wypełnienia I-15M, krzywa 2 w warstwie zasadniczej, a krzywa 3 w całym II stopniu instalacji po jej zmodernizowaniu. Ogólną skuteczność odpylania zachodzącego w warstwach wypełnienia I-15M przedstawiono w tabeli 5.

W zasadniczej warstwie wypełnienia odpylanie zachodzi z mniejszą ogólną skutecznością, ponieważ dopływający do niej strumień spalin wcześniej pozbawiony został (w warstwie wstępnej) większych frakcji cząstek. Ogólna skuteczność odpylania prowadzonego w obu warstwach wypełnienia była większa od 97%, co świadczy o tym, iż zamierzony efekt oczyszczania spalin

Tabela 5. Skuteczność odpylania spalin w drugim stopniu instalacji
 $V_{sp} = 61.400 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Nazwa warstwy usypanej z wypełnieniem I-15M	Stężenie pyłu w spalinach, g/Nm ³		Skuteczność odpylania %	Strum. masy pyłu za warst. wypeł. kg/h
	przed warstwą	za warstwą		
Warstwa wstępna	5,216	0,449	91,40	27,569
Warstwa zasadnicza	0,449	0,117	73,85	7,184
Warstwa wstępna + warstwa zasadnicza	5,216	0,117	97,76	7,184*

* dopuszczalna emisja pyłu dla zespołu suszarniczego wynosi 16,0 kg/h.

został osiągnięty, a tym samym emisja pyłu z suszarni do powietrza atmosferycznego jest mniejsza od dopuszczalnej ($E_{rz}=7,2 \text{ kg/h}$, $E_{dop}=16,0 \text{ kg/h}$).

Skuteczność odpylania gazu podczas przepływu w warstwie wypełnienia można określić wychodząc z założenia, że aerozol poruszając się opisuje w każdej elementarnej warstwie półokrąg i w warunkach przepływu burzliwego jest całkowicie wymieszany. Na podstawie takich założeń wyprowadzono teoretyczną zależność skuteczności odpylania od parametrów operacyjnych procesu i charakterystyki technicznej wypełnienia w postaci [7]:

$$\eta_r = 1 - \exp[-\pi n(du/bu_g)2K] \quad (2)$$

gdzie:

b – szerokość kanału pomiędzy sąsiednimi elementami wypełnienia w warstwie,

d – średnica zewnętrzna elementu wypełnienia,

K – parametr inercyjny,

n – liczba półkolistych łuków opisanych przez gaz podczas przepływu przez warstwę wypełnienia o wysokości H,

u – prędkość liniowa gazu odniesiona do przekroju kolumny,

u_g – prędkość liniowa gazu w swobodnych przestrzeniach wypełnienia.

Parametr inercyjny opisano następującym równaniem:

$$K = d_p^2 u \rho_p / 9 \mu_g d \quad (3)$$

gdzie:

d_p – średnica cząstki pyłu,

μ_g – współczynnik lepkości dynamicznej gazu,

ρ_p – gęstość cząstek pyłu.

Liczbę zataczanych przez gaz półkolistych łuków opisano równaniem w postaci:

$$n = H/(d+b) \quad (4)$$

a prędkość gazu w kanałach wypełnienia równaniem:

$$u_g = u/(\varepsilon - \Delta\varepsilon) \quad (5)$$

gdzie:

ε – porowatość wypełnienia,

$\Delta\varepsilon$ – zatrzymanie cieczy w jednostce objętości wypełnienia.

Wykorzystując teoretyczną zależność na skuteczność odpylania, a także parametry techniczne elementów wypełnienia I-15M oraz hydrodynamiczne warunki operacyjne odpylania i uzyskane wyniki skuteczności odpylania spalin suszarniczych z cząstek flotokonzentratu węgla kamiennego, opracowano równanie doświadczalne, wyznaczające skuteczność odpylania przy krzyżowym przepływie faz w warstwie wypełnienia I-15M. Równanie to ma następującą postać:

$$\eta = 1 - \exp[-16(H/d)2K] \quad (6)$$

Wnioski

◆ Opracowany i wdrożony sposób modernizacji drugiego stopnia odpylania spalin suszarniczych z koncentratu flotacyjnego węgla kamiennego, polegający na wymianie wypełnienia w postaci pierścieni ceramicznych Raschiga na wypełnienie polietylenowe I-15M oraz zmianie przeciwapadowego przepływu faz na krzyżowy i zwiększeniu gęstości zraszania wypełnienia, spowodował zmniejszenie emisji pyłu do powietrza atmosferycznego do wartości znacznie niższej od dopuszczalnej.

◆ Stwierdzono, że rozkład rozmiaru cząstek flotokonzentratu węgla kamiennego w spalinach suszarniczych przed i za badanym odpylaczem ma charakter logarytmiczno-normalny.

◆ Na podstawie analizy parametrów geometrycznych elementów wypełnienia I-15M, a także parametrów operacyjnych odpylania i uzyskanych skuteczności odpylania spalin suszarniczych, opracowano równanie wyznaczające skuteczność odpylania w warunkach krzyżowego kontaktu faz w warstwie tego wypełnienia.

LITERATURA

1. M. GŁOMBA: Ochrona Środowiska, 1990, nr 1-2 (40-41), ss. 41-44.
2. M. GŁOMBA: Raporty Inst. Inż. Ochr. Środow. PWR., 1990, nr SPR-2.
3. Wzór użytkowy nr 29468, 1978.
4. Wzór użytkowy nr 49431, 1988.
5. J. WARYCH: Oczyszczanie przemysłowych gazów odlotowych. WNT, Warszawa 1988.
6. N.F. DERGACZEW: Mokryje zołoułowitiele sistemi WTI. Gasenergoizdat, Moskwa 1960.
7. S. CALVERT: Source Control by Liquid Scrubbing. Air Pollution, 2nd ed., A.C. Stern London, Acad. Press, 1968, pp. 458-496.

Separation of Bituminous-Coal Flotation Concentrate Particles from Drying-Plant Flue Gases on I-15M Ring Packing

The separation process has been improved by replacing the ceramic Raschig ring packing with polyethylene I-15M rings, by changing the phase flow from countercurrent to cross flow, and by increasing the spraying density of the packing layer. The improvements have raised the efficiency of separation from about 60% to about 97%, thus making particulate emissions drop to a level below the admissible value. It has been found that the

distribution of bituminous-coal flotation concentrate particles in the flue gas stream (before and after passage through the separator) follows a log-normal pattern. Making use of the results obtained, the author has derived an equation which describes the separation efficiency for individual fractions on the I-15M ring packing at a cross flow of phases.