

dr hab. inż. JAN HEHLMANN  
inż. KAZIMIERZ NAKONIECZNY

Politechnika Śląska, Instytut Inżynierii Chemicznej i Budowy Aparatury, Gliwice

## Badania i zastosowanie przemysłowe hybrydowego urządzenia do oczyszczania gazów przemysłowych

*Prezentowano nowy aparat do mokrego oczyszczania gazów przemysłowych z pyłów, par i zanieczyszczeń ciekłych. Aparat funkcjonuje w oparciu o hybrydową asocjację mechanizmów separacyjnych, umożliwiając osiągnięcie wysokich skuteczności przy bardzo korzystnych wskaźnikach techniczno-ekonomicznych. Omówiono badania i zastosowania przemysłowe w technologii produkcji litoponu a także w technologii koksowniczej jako urządzenia eliminującego elektrofiltr w procesie kompleksowego oczyszczania surowego gazu koksowniczego.*

### Wstęp

W obrębie technologii przemysłowych występuje szereg specyficznych uwarunkowań, wskazujących na konieczność oczyszczania gazowych mediów z zanieczyszczeń stałych lub ciekłych.

Rozważając wybór suchej lub mokrej metody odpylania gazu należy uwzględnić następujące właściwości metod mokrych:

- zwartą konstrukcję odpylaczy wymagającą mniejszej kubatury oraz mniejszej powierzchni zabudowy dla określonego natężenia przepływu gazu;
- możliwość jednoczesnego oczyszczania gazu z cząstek aerozolowych ciekłych i stałych, a także z zanieczyszczeń gazowych;
- niższe nakłady inwestycyjne w porównaniu z odpylaczami elektrostatycznymi;
- zdolność usuwania z gazu cząstek aerozolowych o rozmiarach od submikronowych do ziaren;
- możliwość zwiększenia skuteczności odpylania przez wzrost wskaźnika zużycia energii;
- wydzielanie pyłu w postaci mokrej, co eliminuje problem wtórnego zapylenia, a w niektórych technologiach stanowi o utylizacji separowanych składników;
- brak specjalnych ograniczeń co do temperatury i zawilżenia wejściowego strumienia gazu, (kondensacja pary w odróżnieniu od elektrofiltrów powoduje wzrost skuteczności odpylania);
- znacznie niższe koszty eksploatacyjne w porównaniu do wysokosprawnych odpylaczy suchych;
- wysoką pewność ruchową zmniejszającą zakres i koszty prac remontowo-konserwacyjnych.

Głównym ograniczeniem w stosowalności odpylaczy mokrych jest wymagana dostateczna ilość wody doprowadzanej do odpylacza celem wytworzenia właściwego mechanizmu separacji zanieczyszczeń. Innym ograniczeniem może być także wymóg wydzielenia pyłu w stanie suchym.

Pewien pogląd na sprawność odpylania w odniesieniu do pyłów standardowych, może dać wykres *Stairmanta* – rys. 2.

Dobre skuteczności odpylania uzyskuje się za pomocą znanych odpylaczy *Venturiego*. Charakteryzują się one jednak wysokimi kosztami eksploatacyjnymi i inwestycyjnymi ( $k_e = (500 + 1250) \text{ dolarów} \cdot \text{s/m}^3 \text{ gazu}$ ), a także koniecznością budowy systemów bateryjnych dla wydajności przekraczających

3000 m<sup>3</sup>/h oraz korzystania z odrębnych węzłów separacji wody obiegowej i wydzielonych pyłów.

Wadą konwencjonalnych rozwiązań jest także sposób pracy bazujący zwykle tylko na jednym, dominującym mechanizmie procesowym.

Przedmiotem niniejszego artykułu jest omówienie nowego urządzenia odpylającego, wdrożonego już w instalacji litoponu i gazu koksowniczego w miejsce elektrofiltru.

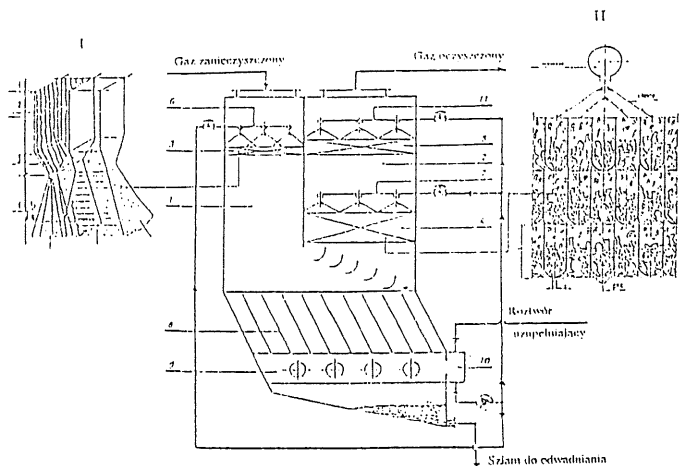
Odpylacz taki pracuje w systemie mokrym osiągając skuteczność separacyjną odpowiadającą odpylaczom *Venturiego* przy obniżonym wskaźniku zużycia energii wynoszącym  $k_{NO} \in (0,07 \dots 0,70) \text{ kW} \cdot \text{s/m}^3$  oraz wskaźniku zużycia wody:  $k_w \in (0,4 \dots 3,8) \text{ dm}^3/\text{m}^3$ . Odpylacz *Venturiego* o porównywalnej skuteczności posiada wskaźniki  $k_{NO} \in (4,0 \dots 10,0)$  i  $k_w \in (0,8 \dots 4,0) \text{ dm}^3/\text{m}^3$ .

Istotną zaletą technologiczną nowego typu aparatu jest hybrydowa asocjacja operacji odpylania, chłodzenia, kondensacji par, absorpcji składników gazowych i zintegrowany – wewnętrzny sposób oczyszczania wody cyrkulacyjnej jako medium procesowego.

### Hybrydowy odpylacz dyspersyjny

Aparat przedstawiony na rys. 1 posiada współprądową strefę dyspersyjną – 1 i przeciwprądową strefę barbotażową – 2, w których reżimy dyspersyjny i barbotażowy są generowane przez wypełnienie komórkowe, zaś w dolnej części aparat posiada eliminator zanieczyszczeń z fazy ciekłej, oparty o system lamelowy. W części współprądowej znajduje się pakiet wypełnienia komórkowego skośnego – 3, zraszanego za pomocą dystrybutora – 6. Dystrybutor posiada wielopunktowe, stożkowe dyspergatory cieczy. Gaz i ciecz przepływają współprądowo, przy czym następuje kilkustopniowa, łańcuchowa separacja zanieczyszczeń poprzez:

- promieniowo-osiowy wtrysk wody do strugi gazowej,
- koncentrację fazy gazowo-pyłowej oraz ciekłej w obrębie wypełnienia komórkowego, a także ich akcelerację i dyspersję we współprądowym przepływie przez charakterystyczny układ szczelinowy,
- kondensację pary wodnej zawartej w gazie i wystąpienie mechanizmu termoforezy, stymulującego proces odpylania,
- wystąpienie bezwładnościowego mechanizmu separacyjnego przy uderzeniowym przepływie strugi do sekcji przeciwprądowo-separacyjnej.



Rys. 1. Dyspersyjny aparat hybrydowy do oczyszczania gazów przemysłowych: I – Ilustracja współprądowego reżimu dyspersyjnego: 1 – strefa dyspersji pierwotnej, 2 – strefa przepływu dyspersyjno-warstwowego, 3 – strefa kompresji faz, 4 – strefa dyspersji wtórnej, a, b – krzyżujące się strugi dyspersyjne; II – Ilustracja przeciwpłądowego reżimu barbotażowego

W części przeciwpłądowej znajduje się pakiet wypełnienia komórkowego – 4, w obrębie którego generowany jest intensywny reżim barbotażowy, umożliwiający wysokosprawne odpylenie drobnych cząstek pyłowych (poniżej 5  $\mu\text{m}$ ). Gaz oczyszczony, wypływający z aparatu, podlega odkropleniu na separatorze komórkowym – 5, który może być okresowo przemylany za pomocą dystrybutora – 11. Ciecz zraszająca jest cyrkulowana w obrębie aparatu poprzez zintegrowany osadnik lamelowy – 8, z którego możliwe jest okresowe, bądź ciągłe odprowadzanie szlamu oraz wody (cieczy) sklarowanej poprzez system kolektorowy – 9. Komora cieczy sklarowanej – 10 posiada także możliwość odświeżania bądź uzupełniania obiegu.

W zależności od wymagań procesowych, aparat może posiadać jeden lub dwa stopnie oczyszczania gazu:

- I stopień współprądowy pracuje w zakresie czynnika przepływowego  $F \in (5 \dots 25)$ , przy oporach przepływu gazu  $\Delta p \in (200 \dots 500)$  Pa,
- II stopień przeciwpłądowy pracuje w zakresie czynnika przepływowego  $F \in (1,5 \dots 7)$ , przy oporach przepływu gazu  $\Delta p \in (200 \dots 600)$  Pa.

Z punktu widzenia procesu odpylania, kluczowe znaczenie posiada stopień współprądowy, niemniej ogólna skuteczność odpylania jest efektem złożonego zbioru mechanizmów fizykalnych, trudnych do oceny w sposób wyizolowany.

#### Badania procesu odpylania w strefie współprądowej

Elementarną ilość pyłu wydzieloną ze strugi gazowej można opisać równaniem:

$$dm_p = V_g \cdot dc \quad [\text{kg/s}] \quad (1)$$

Jednocześnie obowiązuje równanie kinetyczne procesu odpylania:

$$dm_p = k \cdot (c_i - c_i^*) \cdot dF \quad [\text{kg/s}] \quad (2)$$

Zachodzi równość:

$$k \cdot (c_i - c_i^*) \cdot dF = V_g \cdot dc \quad (3)$$

Przyjmując, że dla całego procesu powierzchnia  $F \in (0 \dots F)$ , zaś stężenie zmienia się w granicach ( $c_p \dots c_k$ ), to po uporządkowaniu równania (3), otrzymujemy:

$$\frac{k}{V_g} \cdot \int_0^F dF = \int_{c_p}^{c_k} \frac{dc}{c_i - c_i^*}$$

a po rozwiązaniu:

$$\frac{k}{V_g} \cdot F = \ln \left| \frac{c_p - c_i^*}{c_k - c_i^*} \right| \quad (4)$$

uwzględniając, że  $c_p^* = c_k^*$ , to po przekształceniach otrzymamy:

$$\frac{c_p - c_k}{c_p - c_i^*} = 1 - \exp \left( - \frac{k \cdot F}{V_g} \right) \quad (5)$$

Przyjmując, że w szerokim zakresie ważna jest zależność dla stężenia równowagowego  $c^* = 0$ , co oznacza brak oporu wnikańia masy w fazie ciekłej, to otrzymamy zależność odpowiadającą definicyjnie ogólnej skuteczności odpylania:

$$\eta = \frac{c_p - c_k}{c_p} = 1 - \exp \left( - \frac{k \cdot F}{V_g} \right) \quad (6)$$

Z równania zmiany pędu strugi gazowo-pyłowej można napisać:

$$P \cdot d\tau = m_g \cdot dw \quad (7)$$

zatem po rozdzieleniu zmiennych:

$$m_g \cdot \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{1}{d\tau} = P \cdot \int_{w_1}^{w_2} \frac{1}{dw} \quad (8)$$

otrzymujemy:

$$m_g = \frac{P}{(w_1 - w_2)} \quad , \quad [\text{kg/s}] \quad (9)$$

Ponieważ siła  $P = F \cdot (p_1 - p_2)$ , zatem równanie zmiany pędu dla stanu (1 ... 2), ma postać:

$$m_g \cdot (w_1 - w_2) = F \cdot (p_1 - p_2)$$

oraz

$$V_g \cdot \rho \cdot \Delta w = F \cdot \Delta p$$

skąd:

$$V_g = \frac{F \cdot \Delta p}{\rho \cdot \Delta w} \quad (10)$$

Wobec powyższego, wykładnik równania (6) można przekształcić do postaci

$$\frac{k \cdot F}{V_g} = \frac{k \cdot F \cdot \rho \cdot \Delta w}{F \cdot \Delta p} = \frac{k \cdot \Delta w \cdot \rho}{\Delta p} \quad (11)$$

Uwzględniając, że  $(k \cdot \Delta w) \equiv w_o^2$ , to:

$$\frac{w_o^2 \cdot \rho}{\Delta p} = \frac{1}{Eu} = Eu^*$$

gdzie przyjmuje się funkcijną zależność:

$$Eu^* = x_1 \cdot Eu^{x_2} \quad (12)$$

przy czym liczba *Eulera* jest wyznaczana w oparciu o równanie kryterialne oporów przepływu. Ponieważ:

$$\frac{c_p - c_k}{c_p} = 1 - e^{-Eu^*}$$

to

$$\ln \left| \frac{c_k}{c_p} \right| = -Eu^* \quad (13)$$

Jednocześnie ogólna liczba jednostek wymiany masy:

$$N_{og} = \int_{c_p}^{c_k} \frac{dc}{c_i - c_i^*} \quad (14)$$

zaś dla zależności  $c_i^* = 0$ , otrzymujemy:

$$N_{og} = \ln \left| \frac{c_k}{c_p} \right| \quad (15)$$

Zatem z porównania zależności (13) i (15) wynika, że:

$$N_{og} = -Eu^* \quad (16)$$

Równanie modelowe procesu odpylania, wynikające ze zmiany stanu energetycznego, ma postać:

$$\eta = 1 - \exp(N_{og}) \quad (17)$$

przy czym liczba jednostek wymiany masy pozostaje w funkcyjnym związku z liczbą *Eulera*, określającą spadek ciśnienia strugi gazowej we współprądowej kolumnie dyspersyjnej ze skośnym wypełnieniem komórkowym. Stosując metodę analizy wymiarowej zjawiska przepływowego, sformułowano funkcyjną zależność dla siły oporu:

$$P = f(\rho, w, \eta, d_c, g_{co}, g_c, c_p, c_{po}, d_z, d_{zo}) \quad (18)$$

Zgodnie ze stosowaną metodą analizy wymiarowej otrzymujemy równanie kryterialne oporów przepływu gazu i cieczy przez skośne wypełnienie komórkowe:

$$Eu = c \cdot Re_g^{x_1} \cdot \left( \frac{g_c}{g_{co}} \right)^{x_2} \cdot \left( \frac{c_p}{c_{po}} \right)^{x_3} \cdot \left( \frac{d_z}{d_{zo}} \right)^{x_4} \quad (19)$$

Badania procesu odpylania oraz oporów przepływu przeprowadzono dla układu powietrze – pył talku technicznego, przy współprądowym przepływie aerozolu i wody zraszającej wypełnienie.

**Parametry procesowe przeprowadzonych badań:**

- prędkość przepływu powietrza liczona na wolny przekrój  
 $w \in (10,0; 12,0; 15,0; 18,0; 20,0)$  m/s,
- gęstość zraszania wodą  
 $g_c \in (17,04; 20,44; 29,30; 36,34)$  kg/m<sup>2</sup>s  
 $g_{co} = 46,33$  kg/m<sup>2</sup>s,
- stężenie zapylenia  
 $c_p \in (6,9776; 7,7529; 9,3034; 11,6293; 13,9552)$  g/m<sup>3</sup>,
- liczba warstw wypełnienia komórkowego skośnego  $n=1$ ,
- szerokość komórki  $b=20,0$  mm,
- wysokość warstwy  $h_n=50$  mm,
- szerokość szczeliny  $s \in (1,0 \dots 5,0)$  mm.

Analizę ziarnową talku technicznego przedstawiono w tablicy 1. Średnica zastępcza dla talku technicznego:  $d_z = 17,2 \cdot 10^{-6}$  m.

Tablica 1

Analiza ziarnowa talku technicznego

Klasa ziarnowa pyłu $d_z$ [μm]	0 + 5	5 + 10	10 + 20	20 + 30	30 + 40	40 + 60	60 + 100	100
$x_i$ [%mas]	6,5	8,5	20,0	24,0	15,5	17,0	7,5	1,0

W wyniku analizy bazy doświadczalnej i modelowej procesu odpylania, opracowano zmodyfikowane równanie kryterialne o wyższym stopniu skorelowania i rozszerzonej interpretacji fizycznej procesu.

Równanie modelowe:

$$\eta = \frac{c_p - c_k}{c_p} = 1 - \exp(N_{og}) \quad (20)$$

oraz równanie kryterialne:

$$N_{og} = 46,213 \cdot Re_g^{-0,3116} \cdot \left( \frac{g_c}{g_{co}} \right)^{0,1727} \cdot \left( \frac{c_p}{c_{po}} \right)^{0,7492} \quad (21)$$

stanowią podstawę opracowanego algorytmu projektowego dyspersyjnego odpylacza z wypełnieniem komórkowym, zastosowanego w praktyce przemysłowej, zaś równanie korelacyjne oporów przepływu w badanym przez nas przypadku ma postać:

$$Eu = 48,0459 \cdot Re_g^{1,2813} \cdot \left( \frac{g_c}{g_{co}} \right)^{0,2875} \cdot \left( \frac{c_p}{c_{po}} \right)^{1,2474} \quad (22)$$

**Badania procesu odpylania w strefie przeciwprądowej z pakietowym wypełnieniem komórkowym**

Biorąc pod uwagę możliwość stosowania urządzenia z podwójnym układem oczyszczania gazu (rys. 1), dokonano modyfikacji instalacji badawczej celem zrealizowania badań skuteczności odpylania za pomocą przeciwprądowego systemu o reżimie barbotażowym, generowanym w obrębie pakietu wypełnienia komórkowego – 4. Sposób przeprowadzenia pomiarów przepływowych i analitycznych jak dla współprądu.

Badania przeprowadzono dla:

- zmiennej ilości warstw wypełnienia  $n \in (1 \dots 5)$ ,
  - zmiennej gęstości zraszania  $g_c \in (2,4 \dots 7,3)$  kg/m<sup>2</sup>s,
  - zmiennej prędkości przepływu gazu  $w \in (2,0 \dots 5,0)$  m/s,
  - zmiennej szerokości szczeliny w komórce  $s \in (2,0 \dots 5,0)$  mm,
  - wypełnienia generacji I, o wymiarach:  $b \times h \approx 20 \times 50$  mm.
- Badania przeprowadzono z zastosowaniem kolumny o średnicy 123,3 mm, wykonanej z rury plexiglasowej. Zrealizowanie badań było ułatwione dzięki wcześniejszym pracom, związanym z określeniem hydrauliki i obszaru pracy wypełnienia, a także celowości specyficznego kompletowania pakietów zintegrowanych i pakietów z przestrzeniami ekspansyjnymi. Wyniki badań opracowano w formie równań modułowych z zastosowaniem modelu procesowego w postaci:

$$\eta = 1 - \exp(-Mo) \quad (23)$$

Dla pakietu zwartego uzyskano równanie kryterialne w postaci:

$$Mo = 0,5033 \cdot Re_g^{0,2021} \cdot Re_c^{0,0955} \cdot \left( \frac{n}{n_o} \right)^{0,1824} \cdot \left( \frac{s}{s_o} \right)^{-0,1250} \quad (24)$$

oraz dla pakietu z przestrzeniami ekspansyjnymi o wysokości  $h=20,0$  mm

$$Mo = 0,1870 \cdot Re_g^{0,3051} \cdot Re_c^{0,1629} \cdot \left( \frac{n}{n_o} \right)^{0,2454} \cdot \left( \frac{s}{s_o} \right)^{-0,1250} \quad (25)$$

$s_o = 5,0$  mm – standardowa szerokość szczeliny.

Równania (24) i (25) obowiązują dla zakresu prędkości gazu w charakterystycznym obszarze pracy oraz gęstości zraszania do 7,3 kg/m<sup>2</sup>s, z tym że dla wyższych gęstości zraszania nie obserwowano wzrostu skuteczności odpylania.

Przeprowadzone badania wskazują, że dla pyłu standardowego (talk) skuteczność odpylania zawiera się w przedziale (98,0 ... 99,5)%, gwarantując skuteczne odpylanie pyłów najdrobniejszych i cząstek dymowych. Kombinację systemu współ- i przeciwpłukowego odpylania należy więc uznać za wskazaną w przypadku wybranych technologii o niezwykle ostrych wymaganiach emisyjnych.

### Badania osadnika lamelowego

Badania osadnika lamelowego, pracującego w reżimie współprądowym, przeprowadzono dla suspensji zawierających popiół dymnicowy, szkliwo emalierskie, piasek kwarcowy, a także pył węglowy. Doboru osadnika można dokonać w oparciu o oryginalny algorytm z adaptacją własnych równań modelowych [10].

Modelowe równanie skuteczności separacyjnej ma postać:

$$\eta_s = \frac{c_p - c_k}{c_p} = 1 - \exp(-Mo) \quad (26)$$

Dla zadanej skuteczności i wielkości konstrukcyjnych osadnika wyznacza się maksymalną wartość prędkości przepływu zawiesiny przez układ lamelowy:

$$w_o = \exp \left\{ -4,1528 \cdot \ln \left[ \frac{Mo_{\min}}{3,2364 \cdot Ar^{-0,1447} \cdot \left(\frac{l}{h}\right)^{-0,0195} \cdot \left(\frac{l_s}{h}\right)^{-0,2022} \cdot \left(\frac{n}{n_o}\right)^{-0,6178}} \right] \right\} \quad (27)$$

Niezbędna liczba płyt w układzie:

$$z = 1 + \frac{V}{w_o \cdot b \cdot (h - h_o)} \quad (28)$$

### Badania separatora komórkowego

Badania separatora komórkowego (rys. 1, – 1) przeprowadzono w ramach pracy [9], zaś zmodyfikowaną procedurę analityczną opracowano w ramach pracy [8].

Niezbędną liczbę warstw wypełnienia komórkowego generacji I, można obliczyć wg równania:

$$n = 1,15 \cdot \exp \left\{ 4,93 \cdot \ln \left[ \frac{\ln(1 - \eta_{smin})^{-1}}{0,2578 \cdot St_k^{0,2439} \cdot Re_k^{0,3524} \cdot \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{0,9729}} \right] \right\} \quad (29)$$

przy czym prędkość masowa emitowanych do atmosfery kropeł roztworu:

$$g_{ce} = g_{c2} \cdot (1 - \eta_{smin}) \quad (30)$$

Opory przepływu gazu przez; pakietowe wypełnienie komórkowe, pracujące w reżimie barbotażowym i pakietowe wypełnienie separacyjne, obliczamy wg równania:

$$Eu = 9,74 \cdot \left(\frac{g_c}{g_{gm}}\right)^{0,4112} \cdot We^{-0,4069} \cdot Fr^{0,01} \cdot \left(\frac{\eta_1}{\eta_2}\right)^{-0,1536} \cdot \left(\frac{s}{b}\right)^{-0,3757} \cdot \left(\frac{h}{b_o}\right)^{0,5528} \cdot \left(\frac{n}{n_o}\right)^{0,6277} \quad (31)$$

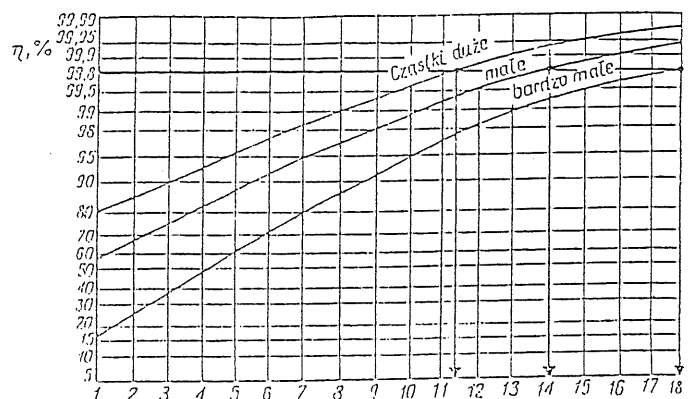
Dla dwustopniowego odpylacza dyspersyjnego można przyjąć, że ogólna skuteczność odpylania będzie podporządkowana hipotetycznemu modelowi:

$$\eta_o = 1 - (1 - \eta_1) \cdot (1 - \eta_2) \quad (32)$$

Przyjmując, zgodnie z przeprowadzonymi badaniami, skuteczność minimalną współprądowego stopnia dyspersyjnego  $\eta_1 = 0,88$  i przeciwpłukowego stopnia barbotażowego  $\eta_2 = 0,98$ , to skuteczność ogólna  $\eta_o = 0,998$ . Stosowanie stopnia dyspersyjnego, mimo obniżonej skuteczności, jest istotne zwłaszcza w przypadku znacznych stężeń początkowych, wysokich temperatur gazu i tendencji do cementowania. Stopień ten zabezpiecza cały odpylacz przed odkładaniem się w nim osadów. Na rys. 2 przedstawiono minimalną opcję odpylacza hybrydowego, tak więc:

- dla cząstek dużych klasyfikuje się on powyżej elektrofiltru mokrego (11),
- dla cząstek małych na poziomie odpylacza Venturiego (14),
- oraz dla cząstek bardzo małych na poziomie filtru tkaninowego (18).

Rezultaty te potwierdzono w praktyce przemysłowej.



Rys. 2. Sprawność odpylania różnych typów odpylaczy: 1 – odpylacz inercyjny, 2 – cyklon wysokosprawny, 5 – odpylacz uderzeniowo-inercyjny (typ Doyle'a), 6 – odpylacz uderzeniowo-inercyjny z kanałami kierującymi, 7 – odpylacz natryskowy przeciepłukowy, 8 – odpylacz z ruchomym wypełnieniem, 9 – odpylacz uderzeniowo-inercyjny (typ Peabody), 10 – elektrofiltr, 11 – elektrofiltr mokry, 12 – odpylacz Venturiego z zalewaną tarczą (średnioenergetyczny), 14 – odpylacz Venturiego (średnioenergetyczny), 15 – elektrofiltr wysokosprawny, 16 – odpylacz Venturiego (wysokoenergetyczny), 17 – filtr tkaninowy wstrząsany, 18 – filtr tkaninowy z przedmuchem pneumatycznym.

### Zastosowania przemysłowe

Kompleksowe badania aparatu hybrydowego, rozszerzone o badania procesu absorpcji i wymiany ciepła [8, 11, 12, 13] umożliwiły racjonalne wdrożenie aparatu w przemyśle.

Wdrożenie dotyczy odpylania emitowanych gazów spalinyowych po suszarkach litoponu 60% w Zakładach Chemicznych w Tarnowskich Górach.

Zastosowano aparat jednostopniowy ze strefą współprądową dla następujących parametrów technicznych:

- natężenie przepływu gazu  $V_g = 6320 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ,
- temperatura gazu (wlotowa)  $t_l = (270 \dots 380)^\circ\text{C}$ ,
- stężenie pyłu  $c_p = 0,89 \text{ g/Nm}^3$ ,
- dopuszczalna emisja  $\varepsilon_{pmax} = 0,15 \text{ kg/h}$ .

Zastosowany aparat hybrydowy wraz z osadnikiem lamelowym posiada przekrój 600 x 1600 mm i wysokość 4100 mm. Natężenie przepływu wody odświeżającej obieg wynosi 2,0 m<sup>3</sup>/h, co daje wskaźnik 0,126 dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> gazu. Opory przepływu gazu przez odpylacz  $\Delta p$  wynoszą (300 ... 400) Pa, zaś skuteczność odpylania kształtuje się powyżej 99,5 %. Temperatura spalin wylotowych nie przekracza 110 °C. Procesowi odpylania i chłodzenia gazu towarzyszy także korzystna absorpcja SO<sub>2</sub> zawartego w gazach prażalniczych.

Kolejne zastosowanie aparatu hybrydowego dotyczy linii gazu koksowniczego w miejsce elektrofiltru typu 180S w Zakładach Koksowniczych w Zdzeszowicach. Aparat użyto przy natężeniu przepływu gazu koksowniczego (45 ... 65) tys. Nm<sup>3</sup>/h, celem wydzielenia z gazu pyłu koksowego i mgły smołowej. Ilość wody zafenolowanej, odświeżającej obieg wynosi (3,7 ... 5,0) m<sup>3</sup>/h, co daje wskaźnik (0,06 ... 0,08) dm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> gazu. Wielkość aparatu:

- przekrój 1200 x 2700 mm,
- wysokość 4700 mm.

Hybrydowy odpylacz dyspersyjny został przetestowany dla: natężeń przepływu gazu koksowniczego –  $V_{gn} \in (30 \dots 55)$  tys. Nm<sup>3</sup>/h, ilości wody zafenolowanej świeżej –  $V_o \in (3,7 \dots 5,0)$  m<sup>3</sup>/h, ilości wody w cyrkulacji –  $V_c \in (44,5 \dots 48,5)$  m<sup>3</sup>/h; uzyskując ogólne skuteczności oczyszczania gazu koksowniczego –  $\eta_c \in (88,4 \dots 97,7)\%$ , przy oporach przepływu –  $\Delta p \in (240 \dots 620)$  Pa.

Wyniki przeprowadzonych badań wyrównano metodą najmniejszych kwadratów, uzyskując równania korelacyjne:

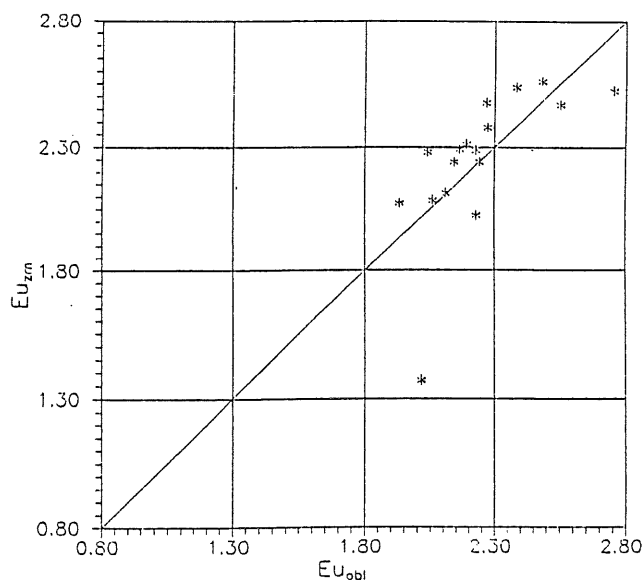
- oporów przepływu,
- całkowitej skuteczności oczyszczania gazu koksowniczego.

Równanie korelacyjne oporów przepływu:

$$Eu_o = 278,3133 \cdot Re_g^{-0,5478} \cdot \left(\frac{g_c}{g_{co}}\right)^{-0,8979} \cdot \left(\frac{c_1}{c_{1o}}\right)^{-6,1374} \quad (33)$$

dla standardowej gęstości zraszania  $g_{co} = 19,0183$  kg/m<sup>2</sup>s i standardowego stężenia wlotowego  $c_{1o} = 37,92$  g/100 Nm<sup>3</sup>, z błędem względnym 15,4%.

Rozkład zależności:  $Eu_{zm} = f(Eu_{obl.})$  przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Rozkład wartości  $Eu_{zm} = f(Eu_{obl})$  dla gazu koksowniczego

Równanie modelowe skuteczności oczyszczania gazu koksowniczego w postaci:

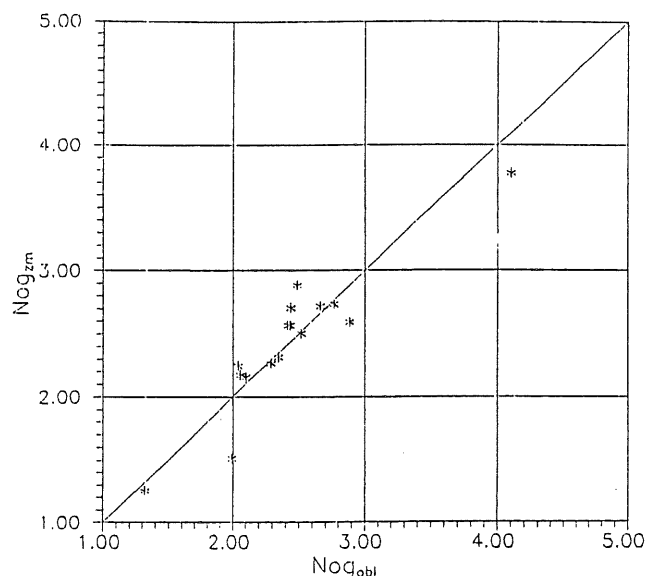
$$\eta_c = 1 - \exp(-N_{og})$$

lub szczegółowe równanie korelacyjne:

$$\eta_c = 1 - \exp\left[3,2816 \cdot Re_g^{-0,1266} \cdot \left(\frac{g_c}{g_{co}}\right)^{2,2799} \cdot \left(\frac{c_1}{c_{1o}}\right)^{0,4503}\right] \quad (34)$$

dla standardowej gęstości zraszania  $g_{co} = 19,0183$  kg/m<sup>2</sup>s i standardowego stężenia wlotowego  $c_{1o} = 37,92$  g/100 Nm<sup>3</sup>, z

błędem względnym  $\pm 13,4\%$ . Rozkład zależności:  $Nog_{zm} = f(Nog_{obl.})$  przedstawia rys. 4.



Rys. 4. Rozkład wartości  $Nog_{zm} = f(Nog_{obl})$  dla gazu koksowniczego

W instalacji stosowane były elektrofiltry typu 180S wg projektu BPPK „Koksoprojekt” z Zabrze. Porównanie oparto o następujące wyróżniki techniczne:

- wyróżnik masy urządzenia

$$k_m = \frac{m_c}{V_{gn}}, \quad [t \cdot s / Nm^3]$$

gdzie:  $m_c$  – masa w stanie roboczym, t,  
 $V_{gn}$  – natężenie przepływu gazu koksowniczego, Nm<sup>3</sup>/h,

- wyróżnik kubatury urządzenia

$$k_v = \frac{V}{V_{gn}}, \quad [m^3 \cdot s / Nm^3]$$

gdzie:  $V$  – objętość całkowita urządzenia, m<sup>3</sup>,  
 $V_{gn}$  – natężenie przepływu gazu koksowniczego, Nm<sup>3</sup>/h,

- wyróżnik zużycia energii, uwzględniający opory przepływu  $\Delta p \in (200 + 500)$  Pa

$$k_{NC} = \frac{N}{V_{gn}} + \frac{V_{gn} \cdot \Delta p \cdot 10^{-3}}{\eta} \quad [kW \cdot s / Nm^3]$$

gdzie:  $N$  – moc prądowa, kW  
 $\Delta p$  – opory przepływu, Pa  
 $V_{gn}$  – natężenie przepływu gazu koksowniczego, Nm<sup>3</sup>/s  
 $\eta$  – sprawność ssawy,  $\eta = 0,62$ .

Porównanie wyróżników technicznych wraz ze wskaźnikiem redukcji zawiera tablica 2.

Pomyślna eksploatacja urządzenia i osiągnięte skuteczności oczyszczania gazu stanowią o możliwości jego zastosowania w pozostałych liniach technologicznych zakładu oraz innych zakładach koksowniczych i pokrewnych.

**Tabela 2**  
Porównanie wyróżników technicznych wraz ze wskaźnikiem redukcji

Wyróżnik techniczny	Elektrofiltr typu 180S	Hybrydowy odpylacz dyspersyjny	Wskaźnik redukcji
Masy urządzenia $k_m$	2,37	0,31	7,65
Kubatury urządzenia $k_v$	17,23	1,096	15,72
Zużycia energii $k_{wc}$	(8,80 ... 15,52)	(5,55 ... 14,29)	(1,53 ... 1,09)

### Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono hybrydowy aparat do kompleksowego oczyszczania gazów przemysłowych, który stanowi nową konstrukcję oraz nową koncepcję procesową, bazującą na asocjacji kilku mechanizmów; odpylania, jednoczesnej wymiany ciepła i masy oraz separacji mgły i cząstek stałych z cieczy. Rozwiązanie takie stanowi o pewnym postępie w zakresie nowych konstrukcji, dając jednocześnie znaczące efekty techniczno-ekonomiczne. Aparat hybrydowy stanowi więc atrakcyjną ofertę w zakresie modernizacji instalacji technologicznych, jak również w procedurach zmierzających do spełnienia wymogów norm ochrony środowiska.

W oparciu o przeprowadzone badania oraz wyniki przemysłowe można sformułować następujące wnioski:

1. Odpylacz hybrydowy z wypełnieniem komórkowym umożliwia skuteczną pracę w szerokim zakresie zmian prędkości przepływu gazu  $w \in (2,0 \dots 20,0)$  m/s oraz gęstości zraszania  $g_c \in (5,5 \dots 28,0)$  kg/m<sup>2</sup>s, co umożliwia jego stosowanie w liniach technologicznych o zmiennej wydajności obu faz.
2. Występujące opory przepływu posiadają przeciętną wartość ok 500 Pa, zaś wartości maksymalne nie przekraczają 600 Pa, co umożliwia stosowanie niskoprężnych wentylatorów osiowych lub promieniowych.
3. W charakterystycznym obszarze pracy, odpylacz osiąga skuteczność odpylania  $\eta \in (95 \dots 99,8)\%$ , umożliwiając cyrkulację cieczy oraz jednoczesne odprowadzenie skoncentrowanego szlamu, bez konieczności stosowania urządzeń zewnętrznych.
4. W ocenie aparatu wzięto pod uwagę następujące elementy:
  - skuteczność odpylania cząstek najdrobniejszych, (tj.  $d_z < 5 \mu\text{m}$ ), wynosi powyżej 92,54% mas. pyłu, co kwalifikuje nowe rozwiązanie pomiędzy odpylaczem z ruchomym wypełnieniem, a odpylaczem uderzeniowo-inercyjnym półkowym typu *Peabody*,
  - wskaźnik zużycia mocy w procesie odpylania wynosi:  $N/V_{gn} \in (0,5 \dots 0,05)$  kW · s/m<sup>3</sup>, co oznacza że wg skali *Calverta* jest to odpylacz o najniższym zapotrzebowaniu energii, (przeciętne wartości wynoszą 1,5 dla elektrofiltrów i 15,0 dla skrubierów *Venturiego*),
  - wskaźnik obniżki kosztów inwestycyjnych w porównaniu ze skrubierem wypełnionym wynosi  $k_I = 0,3$ , co wynika z ograniczenia kubatury urządzenia.

Reasumując ocenę porównawczą odpylacza dyspersyjnego, można w sposób uzasadniony stwierdzić, że stanowi on nowoczesne rozwiązanie o niezwykle atrakcyjnych parametrach techniczno-ekonomicznych sprzyjających jego przemysłowemu rozpowszechnieniu.

### Oznaczenia

- $\tau_1, \tau_2$  – przedział czasowy zmiany pędu [s]  
 $w_1, w_2$  – prędkości odpowiadające granicom zmiany pędu [m/s]  
 $k$  – ogólny współczynnik szybkości wydzielania cząstek pyłowych [m/s]  
 $c_i, c_i^*$  – chwilowe stężenie pyłu w fazie gazowej oraz adekwatne stężenie równowagowe w fazie ciekłej [kg/m<sup>3</sup>]

- $dm_p$  – elementarny strumień wydzielanego pyłu [kg/s]  
 $V_g$  – natężenie przepływu gazu [m<sup>3</sup>/s]  
 $dc$  – elementarna zmiana stężenia pyłu w gazie [kg/m<sup>3</sup>]  
 $c_p$  – rzeczywiste stężenie pyłu w gazie wlotowym [kg/m<sup>3</sup>]  
 $c_{po}$  – standardowe stężenie pyłu w gazie [kg/m<sup>3</sup>]  
 $d_z$  – średnica ziarna zastępczego [m]  
 $d_{zo}$  – średnica ziarna standardowego [m]  
 $dF$  – elementarna powierzchnia kontaktu faz [m<sup>2</sup>]  
 $\Delta p$  – opory przepływu gazu [Pa]  
 $\rho_g$  – gęstość gazu [kg/m<sup>3</sup>]  
 $d_e = \frac{2 \cdot s \cdot b}{s + b}$  – ekwiwalentna szerokość szczeliny [m]  
 $s$  – rzeczywista szerokość szczeliny [m]  
 $b$  – rzeczywista szerokość komórki [m]  
 $w$  – średnia prędkość przepływu gazu w przekroju poprzecznym aparatu [m/s]  
 $w_{rz}$  – rzeczywista prędkość przepływu gazu w przekroju czynnym [m/s]  
 $\eta_g$  – lepkość dynamiczna gazu [Pa · s]  
 $\eta_c$  – lepkość dynamiczna cieczy [Pa · s]  
 $gc$  – prędkość masowa cieczy w przeliczeniu na czynny przekrój wypełnienia komórkowego [kg/m<sup>2</sup>s]  
 $g_{co}$  – standardowa prędkość masowa cieczy [kg/m<sup>2</sup>s]  
 $s$  – szerokość szczeliny wypełnienia komórkowego [mm]  
 $s_o$  – szerokość szczeliny standardowej [mm],  $s_o = 3,0$  mm

### Liczby bezwymiarowe

- $Re_g = \frac{w \cdot d_e \cdot \rho_g}{\eta_g}$  – liczba *Reynoldsa* dla fazy gazowej  
 $Re_c = \frac{g_c \cdot d_e}{\eta_c}$  – liczba *Reynoldsa* dla cieczy  
 $Eu = \frac{\Delta p}{w \cdot \rho_g}$  – liczba *Eulera* dla fazy gazowej  
 $N_{og} = \ln \left| \frac{c_k}{c_p} \right|$  – liczba jednostek wymiany masy  
 $\left\{ \frac{g_c}{g_{co}} \right\}$  – relatywna gęstość zraszania  
 $\left\{ \frac{c_p}{c_{po}} \right\}$  – relatywne stężenie pyłu w gazie  
 $\left\{ \frac{d_z}{d_{zo}} \right\}$  – relatywna średnica zastępcza pyłu  
 $\left\{ \frac{s}{s_o} \right\}$  – relatywna szerokość szczeliny komórkowej  
 Pozostałe oznaczenia wg poz. literaturowych [8, 9, 10, 11, 12, 13].

### LITERATURA

1. J. Warych – Odpylanie gazów metodami mokrymi, WNT Warszawa 1979.
2. J. Warych – Oczyszczanie przemysłowych gazów odlotowych, WNT Warszawa 1988.
3. J. Wojciechowski – Pomiary w elektrowniach cieplnych, PWT Warszawa 1968.
4. E. Raszka – Pomiary zapylenia gazów w przewodach, Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1969.
5. J. Juda – Pomiary zapylenia i techniki odpylania, WNT Warszawa 1968.
6. T. Kuratow – Pomiary przepływów cieczy, par i gazów, Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1967.
7. J. Pikoń – Aparatura Chemiczna, PWN Warszawa 1978.
8. J. Hehlmann – Badania procesowe aparatu kolumnowego z wypełnieniem komórkowym, Zeszyty Naukowe Pol. Śl. z. 125, Gliwice 1991.
9. S. A. H. Beia – Badania odkraplacza z wypełnieniem komórkowym, Praca Doktorska, Pol. Śl. Gliwice 1981.
10. J. Pikoń, J. Hehlmann – Zastosowanie osadników lamelowych w przemysłowych liniach technologicznych, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 5, (1989).

**Tablica 2**  
Porównanie wyróżników technicznych wraz ze wskaźnikiem redukcji

Wyróżnik techniczny	Elektrofiltr typu 180S	Hybrydowy odpylacz dyspersyjny	Wskaźnik redukcji
Masy urządzenia $k_m$	2,37	0,31	7,65
Kubatury urządzenia $k_v$	17,23	1,096	15,72
Zużycia energii $k_{NC}$	(8,80 ... 15,52)	(5,55 ... 14,29)	(1,53 ... 1,09)

### Podsumowanie i wnioski

W artykule przedstawiono hybrydowy aparat do kompleksowego oczyszczania gazów przemysłowych, który stanowi nową konstrukcję oraz nową koncepcję procesową, bazującą na asocjacji kilku mechanizmów; odpylania, jednoczesnej wymiany ciepła i masy oraz separacji mgły i cząstek stałych z cieczy. Rozwiązanie takie stanowi o pewnym postępie w zakresie nowych konstrukcji, dając jednocześnie znaczące efekty techniczno-ekonomiczne. Aparat hybrydowy stanowi więc atrakcyjną ofertę w zakresie modernizacji instalacji technologicznych, jak również w procedurach zmierzających do spełnienia wymogów norm ochrony środowiska.

W oparciu o przeprowadzone badania oraz wyniki przemysłowe można sformułować następujące wnioski:

1. Odpylacz hybrydowy z wypełnieniem komórkowym umożliwia skuteczną pracę w szerokim zakresie zmian prędkości przepływu gazu  $w \in (2,0 \dots 20,0)$  m/s oraz gęstości zraszania  $g_c \in (5,5 \dots 28,0)$  kg/m<sup>2</sup>s, co umożliwia jego stosowanie w liniach technologicznych o zmiennej wydajności obu faz.
2. Występujące opory przepływu posiadają przeciętną wartość ok 500 Pa, zaś wartości maksymalne nie przekraczają 600 Pa, co umożliwia stosowanie niskoprężnych wentylatorów osiowych lub promieniowych.
3. W charakterystycznym obszarze pracy, odpylacz osiąga skuteczność odpylania  $\eta \in (95 \dots 99,8)\%$ , umożliwiając cyrkulację cieczy oraz jednoczesne odprowadzenie skoncentrowanego szlamu, bez konieczności stosowania urządzeń zewnętrznych.
4. W ocenie aparatu wzięto pod uwagę następujące elementy:
  - skuteczność odpylania cząstek najdrobniejszych, (tj.  $d_z < 5 \mu\text{m}$ ), wynosi powyżej 92,54% mas. pyłu, co kwalifikuje nowe rozwiązanie pomiędzy odpylaczem z ruchomym wypełnieniem, a odpylaczem uderzeniowo-inercyjnym półkowym typu *Peabody*,
  - wskaźnik zużycia mocy w procesie odpylania wynosi:  $N/V_{gn} \in (0,5 \dots 0,05)$  kW · s/m<sup>3</sup>, co oznacza że wg skali *Calverta* jest to odpylacz o najniższym zapotrzebowaniu energii, (przeciętne wartości wynoszą 1,5 dla elektrofiltrów i 15,0 dla skrubierów *Venturiego*),
  - wskaźnik obniżki kosztów inwestycyjnych w porównaniu ze skrubierem wypełnionym wynosi  $k_1 = 0,3$ , co wynika z ograniczenia kubatury urządzenia.

Reasumując ocenę porównawczą odpylacza dyspersyjnego, można w sposób uzasadniony stwierdzić, że stanowi on nowoczesne rozwiązanie o niezwykle atrakcyjnych parametrach techniczno-ekonomicznych sprzyjających jego przemysłowemu rozpowszechnieniu.

### Oznaczenia

- $\tau_1, \tau_2$  – przedział czasowy zmiany pędu [s]  
 $w_1, w_2$  – prędkości odpowiadające granicom zmiany pędu [m/s]  
 $k$  – ogólny współczynnik szybkości wydzielania cząstek pyłowych [m/s]  
 $c_i, c_i^*$  – chwilowe stężenie pyłu w fazie gazowej oraz adekwatne stężenie równowagowe w fazie ciekłej [kg/m<sup>3</sup>]

- $dm_p$  – elementarny strumień wydzielanego pyłu [kg/s]  
 $V_g$  – natężenie przepływu gazu [m<sup>3</sup>/s]  
 $dc$  – elementarna zmiana stężenia pyłu w gazie [kg/m<sup>3</sup>]  
 $c_p$  – rzeczywiste stężenie pyłu w gazie wlotowym [kg/m<sup>3</sup>]  
 $c_{po}$  – standardowe stężenie pyłu w gazie [kg/m<sup>3</sup>]  
 $d_z$  – średnica ziarna zastępczego [m]  
 $d_{zo}$  – średnica ziarna standardowego [m]  
 $dF$  – elementarna powierzchnia kontaktu faz [m<sup>2</sup>]  
 $\Delta p$  – opory przepływu gazu [Pa]  
 $\rho_g$  – gęstość gazu [kg/m<sup>3</sup>]  
 $d_e = \frac{2 \cdot s \cdot b}{s + b}$  – ekwiwalentna szerokość szczeliny [m]  
 $s$  – rzeczywista szerokość szczeliny [m]  
 $b$  – rzeczywista szerokość komórki [m]  
 $w$  – średnia prędkość przepływu gazu w przekroju poprzecznym aparatu [m/s]  
 $w_{rz}$  – rzeczywista prędkość przepływu gazu w przekroju czynnym [m/s]  
 $\eta_g$  – lepkość dynamiczna gazu [Pa · s]  
 $\eta_c$  – lepkość dynamiczna cieczy [Pa · s]  
 $gc$  – prędkość masowa cieczy w przeliczeniu na czynny przekrój wypełnienia komórkowego [kg/m<sup>2</sup>s]  
 $g_{co}$  – standardowa prędkość masowa cieczy [kg/m<sup>2</sup>s]  
 $s$  – szerokość szczeliny wypełnienia komórkowego [mm]  
 $s_o$  – szerokość szczeliny standardowej [mm],  $s_o = 3,0$  mm

### Liczby bezwymiarowe

- $Re_g = \frac{w \cdot d_e \cdot \rho_g}{\eta_g}$  – liczba *Reynoldsa* dla fazy gazowej  
 $Re_c = \frac{g_c \cdot d_e}{\eta_c}$  – liczba *Reynoldsa* dla cieczy  
 $Eu = \frac{\Delta p}{w \cdot \rho_g}$  – liczba *Eulera* dla fazy gazowej  
 $N_{og} = \ln \left| \frac{c_k}{c_p} \right|$  – liczba jednostek wymiany masy  
 $\left( \frac{g_c}{g_{co}} \right)$  – relatywna gęstość zraszania  
 $\left( \frac{c_p}{c_{po}} \right)$  – relatywne stężenie pyłu w gazie  
 $\left( \frac{d_z}{d_{zo}} \right)$  – relatywna średnica zastępcza pyłu  
 $\left( \frac{s}{s_o} \right)$  – relatywna szerokość szczeliny komórkowej

Pozostałe oznaczenia wg poz. literaturowych [8, 9, 10, 11, 12, 13].

### LITERATURA

1. J. Warych – Odpylanie gazów metodami mokrymi, WNT Warszawa 1979.
2. J. Warych – Oczyszczanie przemysłowych gazów odlotowych, WNT Warszawa 1988.
3. J. Wojciechowski – Pomiary w elektrowniach ciepłych, PWT Warszawa 1958.
4. E. Raszka – Pomiary zapylenia gazów w przewodach, Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1969.
5. J. Juda – Pomiary zapylenia i techniki odpylania, WNT Warszawa 1968.
6. T. Kuratow – Pomiary przepływów cieczy, par i gazów, Wydawnictwo „Śląsk” Katowice 1967.
7. J. Pikoń – Aparatura Chemiczna, PWN Warszawa 1978.
8. J. Hehlmann – Badania procesowe aparatu kolumnowego z wypełnieniem komórkowym, Zeszyty Naukowe Pol. Śl. z. 125, Gliwice 1991.
9. S. A. H. Beia – Badania odkraplacza z wypełnieniem komórkowym, Praca Doktorska, Pol. Śl. Gliwice 1981.
10. J. Pikoń, J. Hehlmann – Zastosowanie osadników lamelowych w przemysłowych liniach technologicznych, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 5, (1989).