

## SCHŁADZANIE, ODPYLANIE I NEUTRALIZACJA GAZÓW ODLOTOWYCH W SKRUBERZE O KRZYŻOWYM PRZEPLYWIE FAZ

Aparaty służące do schładzania, odpylania i neutralizacji gazów odlotowych, w których gaz kontaktuje się z rozpyloną cieczą, stanowią grupę najtańszych w budowie i eksploatacji urządzeń. Zwykle proces schładzania gazów odlotowych towarzyszy procesowi odpylania lub neutralizacji tych gazów, a często procesy te występują jednocześnie. Dlatego też, analizując pracę absorberów zraszanych można ograniczyć się do procesów odpylania i neutralizacji gazów odlotowych tym bardziej, że proces schładzania jest prosty w realizacji i stosunkowo dobrze poznany od strony teoretycznej i praktycznej.

Odpylanie i absorpcja realizowane w skrubkach z uwagi na ograniczone zastosowanie w technice oczyszczania gazów odlotowych nie są dostatecznie poznane, a uzyskane przez wielu badaczy korelacje, opisujące te procesy, nie dają się stosować do wszystkich występujących w praktyce przypadków.

Oprócz prostoty konstrukcji tego typu aparatów oraz niskich kosztów budowy i eksploatacji ważną ich cechą dodatnią jest możliwość pracy w obszarze znacznych obciążeń fazą ciekłą i gazową przy niskich oporach hydraulicznych. Efekt pracy skrubera, jako urządzenia odpylającego, zależy od szeregu zjawisk występujących przy zraszaniu zapylnych gazów kroplami cieczy [1].

Badania wykazały, że odpylanie następuje wskutek takich zjawisk jak: zderzenie się kropelek cieczy z ziarnami pyłu, dyfuzji, kondensacji pary wodnej zawartej w gazie, zwilżalności pyłu, rozdrobnienia gazu, sedymentacji pyłu i zjawisk elektrostatycznych.

Efekt absorpcji w skrubkach zależy od wielu czynników, wpływających na wartość współczynnika przenikania masy i powierzchni międzyfazowej. Stwierdzono, że czynnikami wywierającymi wpływ na efekt absorpcji są: prędkość fazy gazowej, ilość cieczy zraszającej i wysokość kolumny [2, 3]. Badania dowiodły, że wartości współczynnika masy po stronie fazy ciekłej nie zależą od prędkości gazu tylko do pewnego momentu, a następnie daje się zauważyć wzrost w funkcji prędkości gazu [3]. Stwierdzono również na drodze doświadczeń,

że współczynnik wnikania masy po stronie fazy ciekłej oraz powierzchnia kontaktu międzyfazowego rosną w funkcji natężenia przepływu cieczy, natomiast współczynnik wnikania masy po stronie fazy gazowej nie zależy od ilości rozpylonej w skrubkach cieczy.

Wysokość skrubera, w przeciwieństwie do ogólnego mniemania, wpływa na wielkość powierzchni międzyfazowej i współczynnik przenikania masy. Największa powierzchnia międzyfazowa znajduje się w pobliżu rozpylacza. W niewielkiej odległości od rozpylacza cieczy (około 60 cm) uwidacznia się zjawisko koagulowania drobnych kropelek cieczy w cząstki większe, przez co zmniejsza się powierzchnia kontaktu międzyfazowego [4]. Ważnym czynnikiem jest również zjawisko deformowania spadającej kropli, na skutek czego, jej pierwotny kształt kulisty ulega zmianie na kształt sferoidy oraz spłaszczeniu w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu [5] lub przyjmuje kształt cylindryczny. Deformacja kropelki cieczy z kształtu kulistego na kształt cylindryczny obniża wartość absorpcji od 81,5% w stosunku do absorpcji zachodzącej na kroplach w kształcie kuli.

W Instytucie Inżynierii Ochrony Środowiska Politechniki Wrocławskiej prowadzi się między innymi badania mierzące do redukcji zanieczyszczeń gazowych w absorberach zraszanych, w których ciecz jest rozpylana za pomocą dysz. Do absorpcji gazów dobrze rozpuszczalnych w cieczach, jak np. HF opracowano skrubek o krzyżowym przepływie faz. Opracowanie konstrukcji absorbera zmierzało do maksymalnego wyeliminowania wad charakterystycznych dla klasycznych absorberów zraszanych o przeciwnieprądowym przepływie faz. Zamierzony cel osiągnięto między innymi przez:

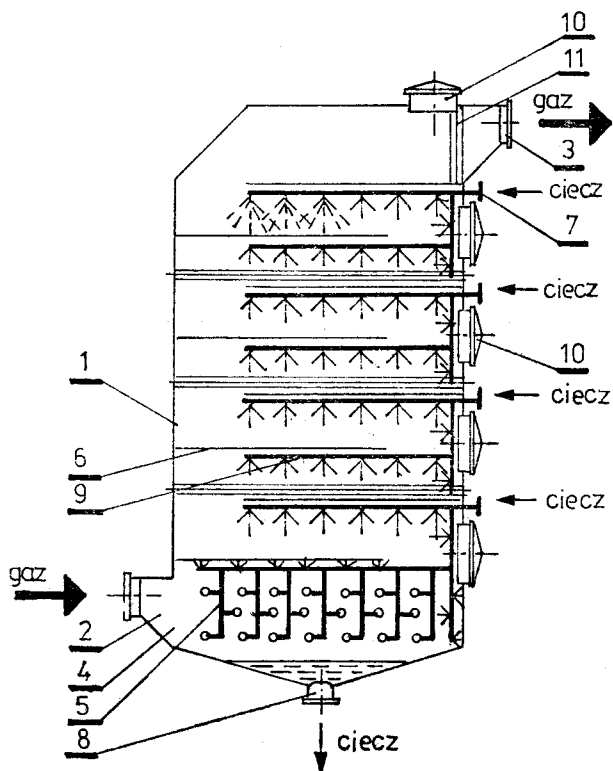
- wydłużenie drogi kontaktu międzyfazowego, bez konieczności budowania absorbera o znacznej wysokości
- zwiększenie prędkości przepływu gazu
- zmniejszenie drogi opadania kropelek cieczy do wysokości, na której jeszcze nie występuje ich koagulacja

d) zastosowanie w dolnej części, w której często zachodzi zarastanie wewnętrznych powierzchni skrubera pyłem lub wydzielającym się osadem, będącym produktem reakcji (np.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  itp.), sekcji dysz, skierowanych swoim wylotem w kierunku powierzchni skrubera

e) zastosowanie dowolnej ilości przegród nachylonych, pod dowolnie korzystnym kątem w stosunku do płaszczyzny poziomej i zraszanie przestrzeni między przegrodami indywidualnymi sekcjami dysz

f) wymuszenie zmian kierunku przepływu fazy gazowej, wpływających korzystnie na efekt wymiany masy, odpylania i odkraplania gazów.

Schemat skrubera o krzyżowym przepływie faz przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Schemat skrubera o krzyżowym przepływie faz. 1 — ścianka skrubera, 2 — króciec wylotowy gazu, 3 — króciec wylotowy gazu, 4 — przestrzeń wlotowa skrubera, 5 — sekcja dysz zmywających, 6 — przegroda, 7 — króciec doprowadzający ciecz, 8 — króciec odprowadzający ciecz, 9 — sekcja dysz zraszających, 10 — właz, 11 — odkraplacz

Gorące, zapyłone i zawierające szkodliwe dla naturalnego środowiska człowieka związki — gazy odlotowe wprowadza się do wnętrza skrubera, ograniczonego ściankami (1) za pośrednictwem króćca wlotowego (2). W przestrzeni znajdującej się w dolnej części skrubera (4) następuje gwałtowne rozprężanie się gazów, co korzystnie wpływa na ich ochłodzenie, prowadzące w efekcie do gwałtownej zmiany wilgotności względnej i kondensacji zawartej w gazach pary wodnej. Niesione z gazami cząstki stałe o większych rozmiarach ulegają sedimentacji na skutek zmniejszenia się prędkości przepływu gazów. Powierzchnie ograniczające

przestrzeń wlotową (4) są w sposób ciągły zmywane cieczą z sekcji dysz (5) o wylotach skierowanych w kierunku tych powierzchni. Jednocześnie następuje płukanie gazów rozpylaną cieczą za pośrednictwem sekcji dysz zraszających (9), wbudowanych do każdej przestrzeni między przegrodami. Ciecz do sekcji dysz doprowadza się króćcami (7). W zależności od stopnia zapylenia i żądanego stopnia neutralizacji gazów oraz ich temperatury ilość cieczy podawanej do skrubera można regulować przez wyłączenie jednej lub kilku sekcji dysz zraszających, rozpoczynając od pierwszej górnej. Zużyta, a więc gorąca i zanieczyszczona ciecz odprowadza się ze skrubera króćcem wylotowym (8) do urządzeń, w których następuje jej oczyszczenie z zanieczyszczeń stałych (osadnik), ochłodzenie do temperatury, umożliwiającej ponowne jej wprowadzenie do skrubera (chłodnia), a jeżeli zajdzie potrzeba również jej neutralizacja (reaktor).

Efekt odpylania i absorpcji zwiększa się na skutek przechodzenia gazów przez „kurtyne” utworzoną z cieczy, spływającej z przegrody na przegrodę. W trakcie przechodzenia gazów przez „kurtyne” ciekową następuje jej rozrywanie na drobne kropelki, a efekt rozdrobnienia zależy od prędkości gazów między przegrodami (6) w przekroju tworzenia się „kurtyny”. W przestrzeni między przegrodami na skutek nachylenia kolejnych przegród względem siebie pod pewnym kątem (do  $30^\circ$ ), prędkość gazów wzrasta aż do momentu, gdy zmienia się ich kierunek przepływu.

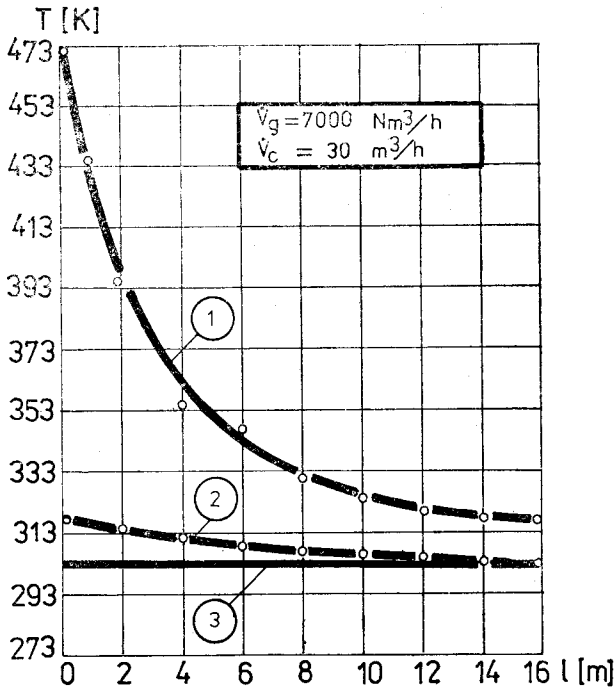
Zmiana kierunku przepływu powoduje wymieszanie gazów oraz wytrącenie się z nich aglomerującego i nawilżonego pyłu. Dla umożliwienia dostępu do poszczególnych sekcji dysz zraszających przewidziano włazy (10), a w celu wychwycenia z gazów porwanych kropel cieczy przed króćcem (3), wyprowadzającym gazy ze skrubera przewidziano odkraplacz płycinowy (11). Wielkość urządzenia, a tym samym długość drogi kontaktu międzyfazowego można zmieniać przez zastosowanie budowy członowej. Każdy człon zawierałby dwie przegrody, sekcję dysz zraszających i właz.

Skruber o krzyżowym przepływie faz znalazł zastosowanie w technologii oczyszczania gazów odlotowych z pyłów i gazowych związków fluoru ( $\text{HF}$  i  $\text{SiF}_4$ ), emitowanych przez huty szkła.

Przeprowadzone prace badawcze pozwoliły określić takie parametry skrubera: rozkład temperatur cieczy i gazów w skrubierze, opory przepływu gazów, sprawność odpylania gazów i współczynniki wnikania masy. Badania wykonano dla układu: gazy ze związku fluoru — roztwór  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (max. stężenie  $40\%$ ).

Rozkład temperatur cieczy i gazu w skrubierze w funkcji odległości od wlotu gazu do skrubera przedstawiono na rys. 2.

Krzywa 1 przedstawia przebieg zmienności temperatury gazu, krzywa 2 przebieg zmienności temperatury cieczy w wyniku kontaktu z gorącymi gazami, natomiast krzywa 3 temperaturę cieczy podawanej do dysz.



Rys. 2. Rozkład temperatur cieczy i gazu w funkcji drogi kontaktu międzyfazowego

Analiza uzyskanych wyników i przebieg krzywych zmienności i temperatur nośników ciepła w skruberze, o krzyżowym przepływie faz, wykazują, że przy obliczaniu różnicy temperatur nośników ciepła można korzystać ze znanej zależności stosowanej przy obliczeniu różnicy temperatur dla nośników ciepła kontaktujących się ze sobą w sposób przeciwnopływu:

$$\Delta T = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Przy korzystaniu z powyższej korelacji popełnia się błąd względny  $\pm 7\%$ .

Rys. 3 przedstawia zależność oporów przepływu od prędkości gazu i ilości cieczy rozpylonej. Krzywa 1 przedstawia opory przepływu dla skrubera, pracującego bez zraszania, krzywa 2 — opory przepływu podczas rozpylania cieczy (wodny roztwór  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) w ilości  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ , a krzywa 3 — opory przepływu podczas rozpylania cieczy w ilości  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Z wzajemnego położenia krzywych na wykresie wynika, że wpływ zraszania skrubera cieczą na opory przepływu gazu przez skrubler jest nieznaczny. Opory przepływu gazu dla skrubera o krzyżowym przepływie faz, pracującego bez zraszania opisano równaniem Darcy-Weisbacha:

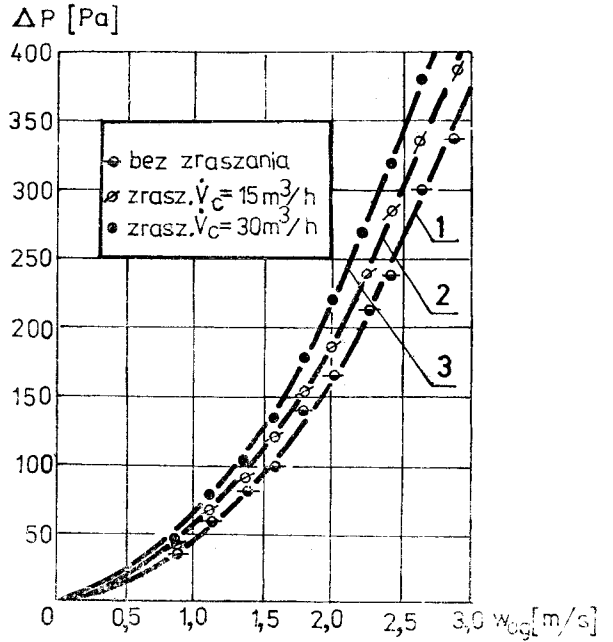
$$\Delta P_s = \lambda \cdot \frac{1}{d_h} \cdot \frac{\omega^2 \cdot \zeta_g}{2}, \text{ Pa}$$

Zależność współczynnika oporu  $\lambda$  opisano równaniem empirycznym:

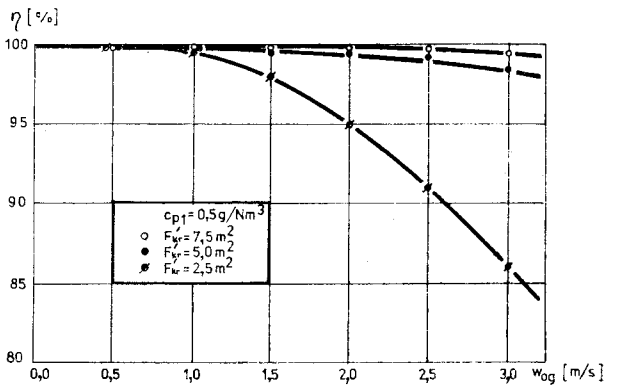
$$\lambda = A \cdot \text{Re}_g^B$$

Dla  $\text{Re}_g \geq 80000$   $\lambda = 4,066 \cdot \text{Re}_g^{-0,086}$ ,  $\delta_{\max} = \pm 3\%$

Dla  $10000 \leq \text{Re}_g < 80000$   $\lambda = 1,296 \cdot 10^4 \cdot \text{Re}_g^{-0,785}$ ,  $\delta_{\max} = \pm 10\%$



Rys. 3. Zależność oporów przepływu od prędkości gazu



Rys. 5. Zależność objętościowego współczynnika wnikania masy w fazie gazowej od prędkości gazu

Opory przepływu w skruberze zraszonym opisano równaniem empirycznym:

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta P_s} = F_{kr}^{0,0744}, \quad \delta_{\max} = \pm 6\%$$

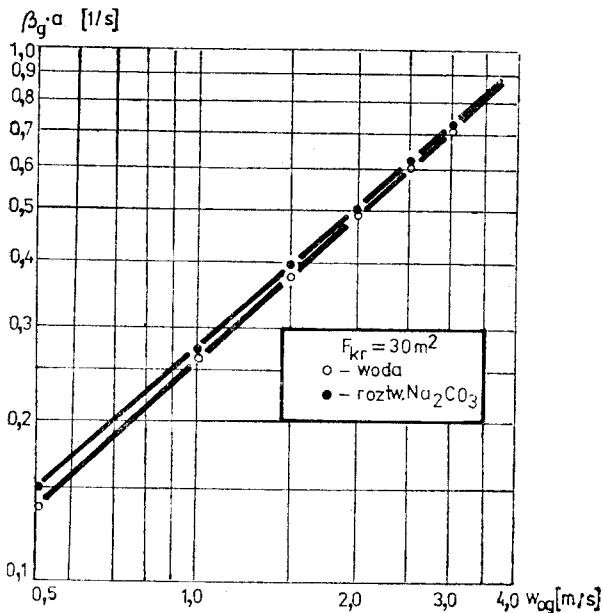
Zależność sprawności odpylania od prędkości gazu w skruberze przedstawia rys. 4.

W zakresie stosowanych prędkości gazu w skruberze otrzymano bardzo wysokie sprawności odpylania dla powierzchni rzutu kropeł powyżej  $5,0 \text{ m}^2$ . Dla powierzchni rzutu kropeł  $2,5 \text{ m}^2$  sprawności odpylania były większe od  $95\%$ , przy stosowaniu prędkości przepływu gazu w skruberze poniżej  $2,0 \text{ m/s}$ .

Na podstawie wyników badań opracowano korelację, umożliwiającą obliczenie sprawności odpylania z maksymalnym błędem względnym  $\pm 8\%$ .

Powyższa korelacja ma postać:

$$\eta = 1 - \exp\left(\frac{-1,522 \cdot F'_{kr}}{Vg}\right)$$



Wyniki badań wpływu prędkości gazu na objętościowy współczynnik wnikania masy w skruberze przedstawia rys. 5.

Otrzymaną zależność na rys. 5 skorelowano do postaci:

$$(\beta_g \cdot a) = 0,278 \cdot w_{og}^{0,87}, 1/s$$

$$Sh_g = 0,08 \cdot Re_g^{0,87} \cdot Sc^{0,33}$$

Powyższe równania słuszne są dla prędkości gazu w zakresie 0,5–3,0 m/s. Maksymalny błąd względny korelacji nie przekracza  $\pm 10\%$ .

### Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań i uzyskanych wyników stwierdzono, że skrubler o krzyżowym przepływie faz zapewnia duży efekt schładzania i odpylania gazów oraz absorpcji dobrze rozpuszczalnych zanieczyszczeń gazowych.

Efekt pracy skrubera zależy od gęstości zraszania i powierzchni rozwijanej przez krople zawieszony w gazie.

Skrubler nie wykazuje znacznych oporów przepływu nawet przy większych obciążeniach fazą ciekłą.

Zastosowanie dysz zmywających powierzchnie dolnej części (wlotowej) skrubera eliminuje groźbę zarastania urządzenia pyłem i wydzielającą się w procesie oczyszczania gazów krzemionką.

### LITERATURA

1. J. ZAJĄCZKOWSKI: Odpylanie w przemyśle, Arkady, Warszawa, 1971.
2. K. C. METHA, M. M. SHARMA: Brit. Chem. Ene, 11(1970), 15, 1440–1444.
3. A. LAURENT, J. C. CHARPENTIER i The Chemical Engineering Journal, 8 (1974), 85–101.
4. N. FRÖSSLING: Gerlands Beitr, Geophys. 52, 1/2, 1938, 170.
5. H. F. JOHNSTONE, G. G. WILLIAMS: Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 31, No 8, 1939.
6. M. GŁOMBA, M. A. GOSTOMCZYK, ST. SUDER: Patent tymczasowy PRL, nr 101910, 1978.
7. M. GŁOMBA, M. A. GOSTOMCZYK: Prace Naukowe Inst. Inż. Ochrony Środow. P. Wr. 41, Seria: Konferencje 8 1976, 105–113.

### OZNACZENIA

A — współczynnik, a — powierzchnia międzyfazowa,  $m^2/m^3$ , B — wykładnik potęgi,  $d_h$  — średnica hydrauliczna, m,  $F'_{kr}$  — powierzchnia rzutu kropli cieczy zawieszonych w skruberze,  $m^2$ ,  $F_{kr}$  — powierzchnia kropli cieczy zawieszonych w skruberze,  $m^2$ , l — długość drogi kontaktu międzyfazowego, m,  $\Delta P_m$  — opory przepływu gazu przez skrubler bez zraszania, Pa,  $\Delta P_s$  — opory przepływu gazu przez skrubler zraszany, Pa,  $\Delta T$  — różnica temperatur, K,  $V_g$  — objętościowe natężenie przepływu gazu,  $m^3/h$ ,  $w_{og}$  — prędkość liniowa gazu, m/s,  $\beta_g \cdot a$  — objętościowy współczynnik wnikania masy w fazie gazowej  $s^{-1}$ ,  $\rho_g$  — gęstość gazu,  $kg/m^3$ ,  $\eta$  — sprawność odpylania gazów, %,  $\lambda$  — współczynnik oporu liniowego,  $\delta_{max}$  — maksymalny błąd względny, %,  $Re_g$  — liczba Reynoldsa, Sc — liczba Schmidta, Sh — liczba Sherwooda.