

Michał Głomba

Powierzchnia międzyfazowa w poziomych przeciwprądowych skruberach natryskowych

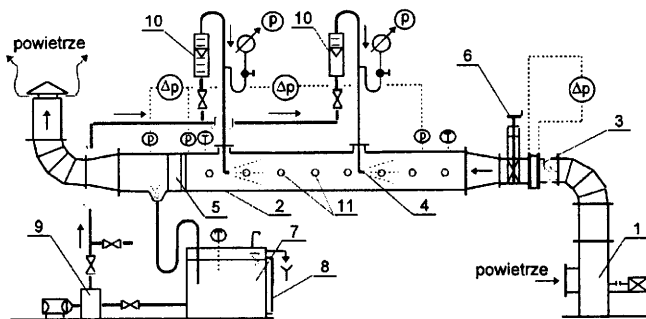
W technice oczyszczania gazów odlotowych znaczące zastosowanie znalazły metody mokre, których istota polega na kontakcie oczyszczanych gazów z cieczą w aparatach zwanych płuczkami (procesy odpylania) lub absorberami (absorpcja zanieczyszczeń gazowych). Jedne i drugie zwykle się nazywać skruberami, a spośród nich prostotą konstrukcji i działania wyróżniają się płuczki i absorbery natryskowe. Stosowane w praktyce oczyszczania gazów odlotowych aparaty natryskowe występują najczęściej jako kolumny pionowe, w których faza cieczą i gazowa przemieszczają się względem siebie współ- lub przeciwprądowo. Rzadziej spotyka się poziome skrubery natryskowe, co wynika z faktu, iż aparaty pionowe wymagają mniej powierzchni terenu pod zabudowę i są dokładniej przebadane pod względem ruchu faz, mechanizmu wydzielenia cząstek pyłu na kropli cieczy oraz kinetyki wnikania ciepła i masy.

Skuteczność oczyszczania gazów odlotowych w skruberach zależy w dużej mierze od wielkości powierzchni kontaktu międzyfazowego. W wypadku płuczek natryskowych w istotnym stopniu zależy ona od stopnia rozdrobnienia cieczy na krople, gęstości zraszania, prędkości fazy gazowej i prędkości opadania kropli w przepływającym względem kierunku ich opadania współ-, przeciwprądowo lub krzyżowo gazu. Wpływ na efekt działania aparatów natryskowych ma również pionowy lub poziomy kierunek przepływu fazy gazowej i kropli rozpylonej cieczy.

Projektowanie płuczek natryskowych, z punktu widzenia dynamiki przepływów strumienia gazów i kropli, a tym samym powierzchni kontaktu międzyfazowego, jest bardzo utrudnione. Występujące w nich zjawiska koalescencji kropli, porywania kropli strumieniem gazu i wynoszenie poza strefę kontaktu z gazem, nierównomierności prędkości przepływu mediów w przekroju, deponowanie kropli na ściankach, zawirowania strumieni gazu i kropli oraz odparowywanie kropli są przyczyną dużych różnic w stosunku do proponowanych w literaturze metod obliczeniowych. W wypadku płuczek poziomych różnice te są znacznie większe, gdyż obserwuje się w nich szybkie zniekształcenie strugi kropli i wypadanie kropli z przestrzeni gazowej na ścianki aparatu.

Opis układu badawczego

Głównym elementem badanego układu (rys.1) był poziomy skruber natryskowy (2), wewnątrz którego umieszczono strumieniowo-wirowe rozpylacze (4), rozpylające ciecz przeciwprądowo w stosunku do przepływającego gazu. Zasasyany z otoczenia gaz (powietrze) o stałej wilgotności doprowadzono



Rys. 1. Schemat instalacji badawczej

do skrubera za pomocą wentylatora (1) i po przepuszczeniu przez skruber odprowadzono do otoczenia. Na przewodzie tłocznym zainstalowano układy do pomiaru prędkości przepływu powietrza (3) i jej regulacji (6) oraz układy do pomiaru jego temperatury (T) i ciśnienia (P). Rozpylana w skruberze ciecz (woda) krążyła w obiegu zamkniętym. Przepływ wody wymuszony pompą (9), a strumień jej objętości (prędkość) mierzono rotametrami (10) przed każdym rozpylaczem. Ciśnienie rozpylania wody i prędkość na wylocie z rozpylacza ustalono za pomocą zaworów umiejscowionych przed rotametrami i manometrów tarczowych umieszczonych przed rozpylaczami. Spływającą ze skrubera wodę odprowadzono do zbiornika (7) wyposażonego w poziomowskaz (8). Unoszone strumieniem powietrza krople wody wychwycono na odkraplaczu inercyjnym (5). Temperaturę tłocznej do rozpylaczy wody mierzono termometrem (T). Spadek ciśnienia powietrza w strefie układu dwufazowego skrubera i na odkraplaczu mierzono mikromanometrami kompensacyjnymi MK-1. Na całej długości strefy układu dwufazowego skrubera wykonano króćce (11), przez które przy pomocy sond odbierano ze strumienia powietrza krople cieczy w badanym przekroju skrubera. Ciecz tę z sond poprzez wężyki odprowadzono do cylindrów mierniczych, służących do określenia objętości cieczy odbieranej w punktach przekroju pomiarowego rozmieszczonych wzdłuż średnicy skrubera.

Warunki prowadzenia badań podano w tabeli 1. Widmo rozpylania wody przy pomocy rozpylacza strumieniowo-wirowego RSW 5 [1] scharakteryzowano w pracy [2].

Tabela 1. Warunki prowadzenia badań

Parametr	Jednostka	Wartość
Średnica wewnętrzna skrubera	m	0,3
Długość strefy układu dwufazowego	m	3,0
Średnica otworu wylotowego rozpylacza	mm	5,0
Średnica wewnętrzna sondy	mm	5
Prędkość powietrza w skruberze	m/s	1,0-8,0
Pozorna gęstość zraszania	m ³ /m ² h	9,1-17,4
Liczba rozpylaczy w skruberze	szt.	1
Ciśnienie rozpylania cieczy	MPa	0,1+0,44
Średnia średnica widma kropli (Sautera)	µm	450-700

Sposób określenia powierzchni kontaktu faz

Powierzchnia kontaktu faz w absorberach natryskowych zależy przede wszystkim od stopnia rozpylenia cieczy na krople. Jeśli znana jest średnia objętościowo-powierzchniowa średnica kropeł (średnica Sautera – d_k), reprezentująca wymiarowo widmo rozpylenia cieczy, wówczas można określić jednostkową powierzchnię (a , m^2/m^3), rozwijaną przez krople w aparacie. Przez rozpylenie cieczy o objętości V (m^3) na krople o znanej średnicy d_k (m), z których każda rozwija powierzchnię πd_k^2 (m^2) i ma objętość $\pi d_k^3/6$ (m^3), otrzymuje się n kropeł o powierzchni $6V/d_k$ (m^2), przy czym $n=6V/(\pi d_k^3)$.

Przy gęstości zraszania $L_c=V/S\tau$ (m^3/m^2s) przez powierzchnię przekroju aparatu S (m^2) w czasie τ (s) przemieszczają się krople z prędkością względną u_{wk} o całkowitej powierzchni $6L_cS\tau/d_k$ (m^2). W ciągu czasu $\tau=1/u_{wk}$ krople te pokonują drogę $l=u_{wk}$ (m), a zatem występują w objętości skrubera $Sl=Su_{wk}\tau$ (m^3). Wobec tego jednostkową powierzchnię kontaktu faz (a , m^2/m^3) w aparacie (odniesioną do jednostki objętości skrubera) można wyrazić równaniem:

$$a = \frac{6L_c}{d_k u_{wk}} \quad (1)$$

Mimo prostoty tego równania praktyczne jego wykorzystanie jest utrudnione, ponieważ gęstość zraszania (L_c) zmienia się na długości (wysokości) i w przekroju skrubera, a prędkość względną kropeł nie zawsze można dokładnie określić, ponieważ na znacznym odcinku przebytej drogi od rozpylacza jest ona zmienna. W wypadku przeciwwprądowego skrubera poziomego prędkość kropeł maleje do zera, a następnie część kropeł o najmniejszych rozmiarach porusza się w kierunku przepływu gazu (obserwuje się zjawisko rewersji kropeł).

Powierzchnię jednostkową rozwijaną na kropkach w skrubrze natryskowym wyznaczono na podstawie:

- określenia (zmierzenia) zasięgu strugi kropeł przed i za rozpylaczem,
- pomiaru rozkładu gęstości zraszania wzdłuż średnicy skrubera w przekrojach przed i za rozpylaczem (liczbę przekrojów dobrano odpowiednio do zasięgu strugi kropeł),
- uśrednienia gęstości zraszania w każdym przekroju pomiarowym (wyznaczenia gęstości lokalnych) i na długości strefy występowania kropeł w strumieniu przepływającego gazu (wyznaczenia rzeczywistej gęstości zraszania),
- określenia czasu przebywania kropeł cieczy w stanie zawieszenia w fazie gazowej,
- określenia objętości cieczy zawieszonyj w fazie gazowej w skrubrze,
- określenia powierzchni kropeł zawieszonych,
- odniesienia powierzchni zawieszonych kropeł do objętości skrubera, w której one występowały podczas przeciwwprądowego przepływu gazu względem kierunku rozpylania cieczy.

Badania takie przeprowadzono dla pozornych gęstości zraszania równych 9,1, 12,3, 14,9 oraz 17,4 m^3/m^2h i prędkości przepływu gazu równych 1,0, 2,0, 4,0, 6,0 oraz 8,0 m/s. Pozorną gęstość zraszania zdefiniowano jako stosunek strumienia objętości rozpylonej cieczy do powierzchni przekroju poprzecznego skrubera ($S=0,07$ m^2). Rzeczywiste gęstości zraszania określono na drodze pomiarów.

Średnią średnicę objętościowo-powierzchniową kropeł (d_k , m) dla zadanych ciśnień rozpylania obliczono przy pomocy równania [2]:

$$d_k = 185m_c^{0,08} \Delta p_r^{-0,353} \quad (2)$$

gdzie:

m_c – strumień masy rozpylonej cieczy, kg/h
 Δp_r – ciśnienie rozpylania cieczy, MPa

W rozważaniach dotyczących ruchu kropeł przyjęto, że przepływ fazy gazowej jest ustalony i odbywa się ze stałą prędkością liniową, a krople rozpylonej cieczy poruszają się w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu fazy gazowej ruchem opóźnionym. Pominięto siłę wyporu i siłę ciężenia, co przy poziomym przepływie faz w skrubrze nie odgrywa większej roli. Opóźnienie ruchu wynika z porównania siły oporu ośrodka i siły opóźniającej ruch kropeł (wobec braku oddziaływania na krople sił zewnętrznych). Dla wszystkich zakresów ruchu można je zapisać równaniem:

$$\frac{du}{dt} = \frac{3}{4} \frac{\rho_g}{\rho_c - \rho_g} c_x \frac{u^2}{d_k} \quad (3)$$

gdzie:

u – względna prędkość kropeł, m/s

ρ_g – gęstość fazy gazowej, kg/m^3

ρ_c – gęstość rozpylonej cieczy, kg/m^3

Stąd czas, po którym początkowa prędkość kropli (u_1) zmieni się do wartości mniejszej (u_2), można określić z zależności uzyskanej po scałkowaniu równania na opóźnienie ruchu:

$$t = -\frac{4}{3} d_k \frac{\rho_c}{\rho_g} \int_{u_1}^{u_2} \frac{du}{c_x u^2} \quad (4)$$

Ponieważ $\lambda=f(Re)$, więc wyrażając prędkość kropeł za pomocą liczby Reynoldsa zdefiniowanej jako:

$$Re = \frac{u d_k \rho_g}{\mu_g} \quad (5)$$

gdzie μ_g jest współczynnikiem lepkości dynamicznej gazu (Pa·s), równanie na czas zmiany prędkości kropeł w założonych granicach można przedstawić zależnością tego czasu od zmian liczby Reynoldsa odpowiadających prędkości rzeczywistej kropeł:

$$t = -\frac{4}{3} d_k^2 \frac{\rho_c}{\mu_g} \int_{Re_1}^{Re_2} \frac{dRe}{c_x Re^2} \quad (6)$$

Równanie to posłużyło do wyznaczenia czasu zawieszenia kropeł w strumieniu gazu podczas przeciwwprądowego przepływu faz w skrubrze. Współczynnik oporu ruchu kropeł (c_x) dla zakresu $0,5 < Re < 800$ wg [3] można opisać formułą:

$$c_x = \frac{24}{Re} (1 + 0,15Re^{0,687}) \quad (7)$$

a wówczas:

$$t = -\frac{4}{3} d_k^2 \frac{\rho_c}{\mu_g} \int_{Re_1}^{Re_2} \frac{dRe}{24Re^{-1} (1 + 0,15Re^{0,687}) Re^2} \quad (8)$$

Wartość Re_1 każdorazowo obliczono dla warunków początkowych, natomiast wartość Re_2 przyjęto jako równą jedności.

Objętość cieczy (V_c , m^3) zawieszonyj w postaci kropeł w aparacie obliczono wg wzoru:

$$V_c = \frac{q_{lrz} S t}{3600} \quad (9)$$

gdzie:

q_{lrz} – rzeczywista gęstość zraszania w strefie występowania kropeł cieczy, m^3/m^2h

S – powierzchnia przekroju poprzecznego aparatu, m^2

t – czas ekspozycji kropeł w aparacie określony wg równania (8), s

Podczas rozpylania cieczy w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu gazu obserwuje się wynoszenie części kropeł ze strefy natrysku przed rozpylaczem za rozpylacz. Powierzchnię kontaktu faz (F, m^2), rozwijaną na będących w zawieszeniu kroplach cieczy, obliczono wg wzoru:

$$F = V_c f = V_c \frac{6}{d_k} \quad (10)$$

gdzie:

f – powierzchnia kropeł o średnicy d_k generowana przez rozpylenie $1 m^3$ cieczy, m^2/m^3

Powierzchnię jednostkową kropeł ($a, m^2/m^3$), rozwijaną na kroplach w $1 m^3$ objętości czynnej aparatu, wyznaczono z równania:

$$a = \frac{F}{V_{skr}} = \frac{F}{S l_{skr}} \quad (11)$$

gdzie:

V_{skr} – objętość skrubera, w której występują krople cieczy, m^3
 l_{skr} – długość strefy kontaktu gaz–ciecz, m

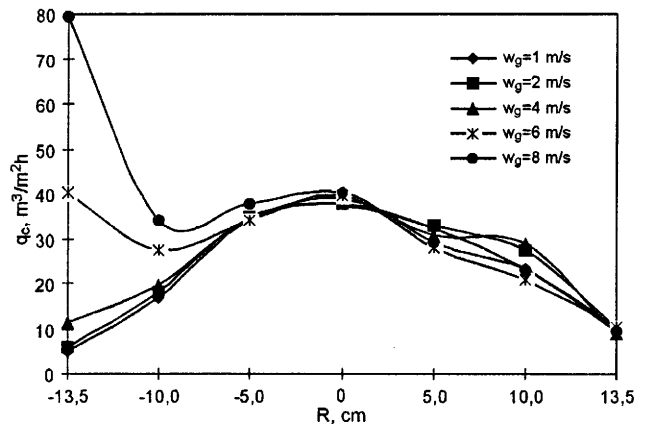
Zasięg strugi kropeł

Zasięg strugi kropeł przed i za rozpylaczem określono w sposób bezpośredni, tj. wzrokowo, a następnie zmierzono położenie punktu na osi aparatu, w którym struga kropeł zanikała. Położenie punktu względem umiejscowienia rozpylacza każdorazowo zlokalizowano przy pomocy sondy wydzielającej krople ze strumienia gazu. W celu zwiększenia dokładności pomiaru do sondy wprowadzono wężyk, którego końcówkę z sondy wysuwano bardziej lub mniej, zależnie od odległości od wlotu sondy do czoła strugi kropeł.

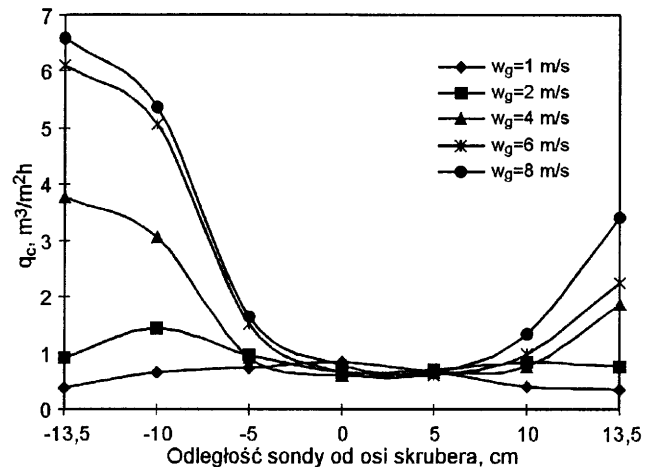
Pozorna i rzeczywista gęstość zraszania

Podczas badań dokonano pomiaru rozkładu gęstości zraszania wzdłuż średnicy skrubera w przekrojach przed i za rozpylaczem. Liczbę przekrojów pomiarowych dostosowano do zasięgu strugi kropeł przed rozpylaczem i odległości, jaką krople pokonują w ruchu rewersyjnym za rozpylaczem. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono przykładowo rozkłady rzeczywistej gęstości zraszania w przekroju znajdującym się w odległości 0,5 m przed rozpylaczem i w przekroju leżącym w odległości 0,3 m za rozpylaczem.

Z badań wynika, że rzeczywista gęstość zraszania w przetrzeniu przed rozpylaczem podczas przeciwnopływowego natrysku cieczy w stosunku do kierunku przepływu gazu w poziomym skrubie natryskowym charakteryzowała się znaczną nierównomiernością (rys.2). W pobliżu osi strugi kropeł (w osi skrubera) gęstość zraszania była największa. Taki stan obserwowano we wszystkich poprzecznych przekrojach skrubera, tj. od rozpylacza aż do miejsca, w którym krople w strudze osiągały prędkość zbliżoną do zera. Zupełnie inny profil rozkładu gęstości zraszania występował za rozpylaczem (rys.3). Największe gęstości zraszania obserwowano w pobliżu ścianki skrubera, a w jego osi były one najmniejsze. Można to tłumaczyć tym, że przeciwnopływową strugą kropeł była ciałem źle oprofilowanym, wskutek czego gaz opływający ją był odchylany na zewnątrz i tam również przemieszczane były porywane jego strumieniem krople cieczy. Występujące przed rozpylaczem rzeczywiste gęstości zraszania były znacznie większe od występujących za rozpylaczem.

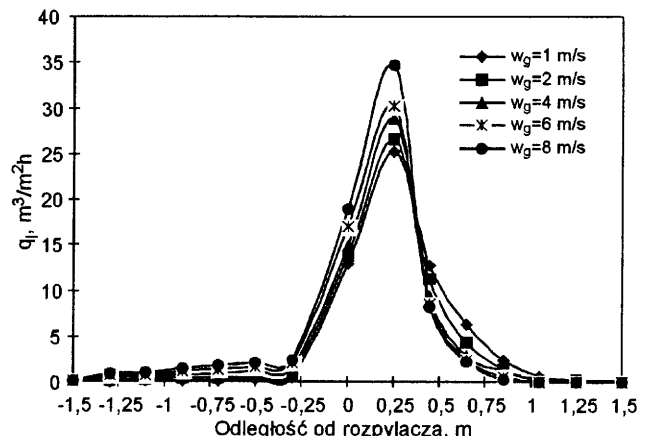


Rys. 2. Rozkład rzeczywistej (lokalnej) gęstości zraszania w przekroju skrubera w odległości 0,5 m przed rozpylaczem ($L_c=14,9 m^3/m^2h$, $\Delta p_i=0,3 MPa$)



Rys. 3. Rozkład lokalnych gęstości zraszania wzdłuż średnicy skrubera w odległości 0,3 m za rozpylaczem ($L_c=14,9 m^3/m^2h$, $\Delta p_i=0,3 MPa$)

Rozkład gęstości zraszania przed i za rozpylaczem, dla przeciwnopływowego kontaktu kropeł cieczy z gazem w poziomym skrubie, przedstawiono na rysunku 4. Świadczy on o tym, że maksymalna gęstość zraszania występowała w pewnej odległości przed rozpylaczem. W wyniku takich czynników, jak porywanie kropeł strumieniem płynącego przeciwnopływowo w skrubie gazu, przemieszczanie kropeł w kierunku ścianek skrubera i wypadanie kropeł ze strumienia gazu do płynącego po ścianie aparatu filmu cieczy, gęstość zraszania poza strefą spiętrzenia kropeł, zwłaszcza od strony frontu strugi kropeł, gwałtownie malała.

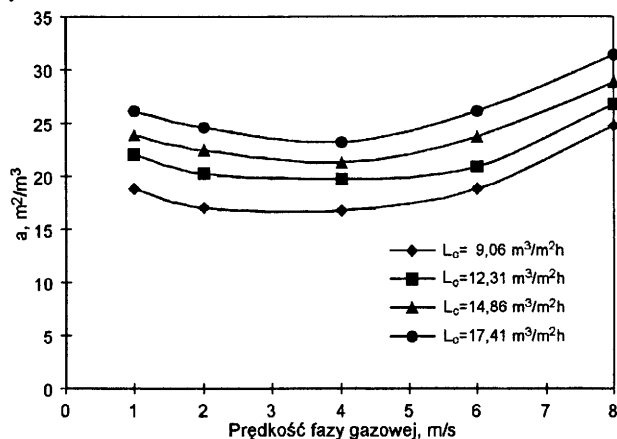


Rys. 4. Rozkład rzeczywistej gęstości zraszania na długości skrubera ($L_c=14,9 m^3/m^2h$, $\Delta p_i=0,3 MPa$)

Chcąc uzyskać w skruberze (w jego strefie roboczej) mniejszą nierównomierność rozkładu gęstości zraszania, należy na długości skrubera stosować kilkumiejscowy (kilkustrefowy) natrysk cieczy. W tym celu należy dla zadanych warunków rozpylania cieczy i stosowanych prędkości przepływu gazu w skruberze określić zasięg formowanej strugi kropeł, a następnie wyposażyć skrubier w taką liczbę stref natrysku cieczy, jaka wynika z podzielenia jego długości przez charakterystyczny dla rozpylacza zasięg strugi kropeł. Działanie takie prowadzi do zminimalizowania długości skrubera, uzyskiwania większej powierzchni właściwej kropeł w skruberze, a tym samym do obniżenia kosztów jego budowy.

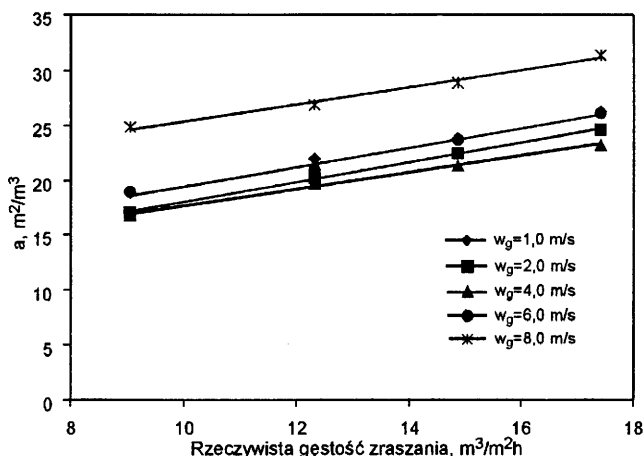
Powierzchnia kontaktu faz

Wyniki badań zależności powierzchni jednostkowej kontaktu faz od prędkości gazu w skruberze, dla kilku zadanych pozornych gęstości zraszania, przedstawiono na rysunku 5.



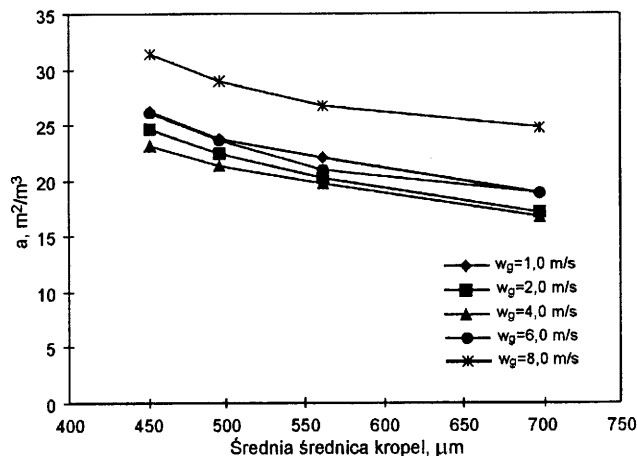
Rys. 5. Zależność jednostkowej powierzchni kontaktu międzyfazowego od prędkości fazy gazowej

Badania te wykazały, że wraz ze wzrostem prędkości gazu powierzchnia jednostkowa (właściwa) kontaktu faz najpierw zmalała, a potem wzrosła. Zmiana charakteru tej zależności zachodziła przy prędkości granicznej gazu równej 4 m/s. Na jednostkową powierzchnię kontaktu faz istotny wpływ wywierała gęstość zraszania. Wzrost gęstości zraszania wywoływał wzrost powierzchni kropeł zawieszonych w skruberze (rys.6).



Rys. 6. Zależność jednostkowej powierzchni kontaktu międzyfazowego od pozornej gęstości zraszania

Powierzchnia międzyfazowa również wzrosła wraz ze wzrostem ciśnienia rozpylania cieczy. Im większe było ciśnienie rozpylania, tym mniejsza była charakteryzująca widmo rozpylania cieczy średnia objętościowo-powierzchniowa średnica kropeł, a tym samym większa była powierzchnia rozwijana na kroplach zawieszonych w skruberze (rys.7).



Rys. 7. Zależność jednostkowej powierzchni kontaktu międzyfazowego od średniej średnicy kropeł

Wyniki badań zależności powierzchni kontaktu faz od prędkości fazy gazowej, pozornej gęstości zraszania i średniej objętościowo-powierzchniowej średnicy kropeł rozpylanej w skruberze cieczy aproksymowano dwoma równaniami. Dla prędkości gazu $w_g \leq 4$ m/s równanie miało następującą postać:

$$a = w_g^{-0,082} L_c^{0,308} d_k^{-0,308} \quad (12)$$

gdzie:

L_c – pozorna gęstość zraszania, m^3/m^2h

d_k – średnia średnica objętościowo-powierzchniowa kropeł, m

w_g – średnia prędkość gazu w skruberze, m/s

natomiast dla prędkości gazu $4 \leq w_g \leq 8$ m/s równanie miało postać:

$$a = w_g^{0,456} L_c^{0,31} d_k^{-0,206} \quad (13)$$

Wszystkie współczynniki występujące w równaniach (12) i (13), jako wykładniki potęgowe, były istotne na poziomie 0,05, a kwadraty współczynników korelacji wielorakiej poprawionych na stopnie swobody R-SQ (ADJ) były zbliżone do jedności, co świadczyło o bardzo dobrym dopasowaniu powierzchni regresji do danych empirycznych. Wyniki analizy regresji (nie zamieszczone w niniejszej pracy) wykazały, że wpływ prędkości gazu i gęstości zraszania w skruberze oraz średnicy kropeł cieczy na wartość jednostkowej powierzchni międzyfazowej był istotny.

Wnioski

♦ W poziomym przeciwpądowym skruberze natryskowym zwiększeniu ciśnienia rozpylania cieczy (a tym samym zmniejszeniu średnicy kropeł) towarzyszyło zmniejszenie zasięgu strugi kropeł przed rozpylaczem i zwiększenie jej zasięgu za rozpylaczem.

♦ Profile gęstości zraszania w skruberze przed i za rozpylaczem znacznie różniły się kształtem. Przed rozpylaczem maksymalna gęstość zraszania występowała w osi skrubera, a za rozpylaczem przy ścianie (w osi skrubera występowała

gęstość najmniejsza). Rzeczywista gęstość zraszania na długości skrubera, wyznaczonej przez zasięg strugi kropel przed i za rozpylaczem, była mniejsza od pozornej.

♦ Jednostkowa powierzchnia kontaktu faz zależała od prędkości gazu, gęstości zraszania i średniej średnicy kropel. Wzrostowi prędkości gazu do 4 m/s towarzyszyło nieznaczne zmniejszenie jednostkowej powierzchni kontaktu międzyfazowego, natomiast zwiększeniu prędkości gazu powyżej 4 m/s towarzyszył wzrost jednostkowej powierzchni kontaktu międzyfazowego. Zwiększenie gęstości zraszania oraz zmniejszenie średnicy kropel powodowało wzrost powierzchni kontaktu międzyfazowego.

♦ W celu uzyskania możliwie dużej powierzchni kontaktu międzyfazowego należy stosować kilkustrefowe rozpylanie cieczy na długości skrubera, przy czym odległość między

rozpylaczami w strefach sąsiednich należy ustalać na podstawie znajomości zasięgu strugi kropel przed i za rozpylaczami w warunkach ruchowych.

LITERATURA

1. M. GŁOMBA: Rozpylacz strumieniowo-wirowy. Wzór użytkowy nr 49431.
2. M. GŁOMBA: Absorpcja HF i SO₂ w przeciwpłądowym skrubierze natryskowym z rozpylaczami typu RSW. Mat. I sympozjum „Ograniczanie emisji zanieczyszczeń – POL-EMIS '92”, PZITS, Inst. Inż. Ochr. Środow. PWr., Szklarska Poręba 1992, ss. 155–164.
3. G. B. WALLIS: One-Dimensional Two-Phase Flow. McGraw Hill, New York 1939.

Interfacial Area in a Horizontal Counter-Current Spray Column

The efficiency with which solid and gaseous pollutants are separated from flue gases via a spray column depends primarily on the size of the interfacial surface. The study reported in this paper concentrated on the interface developing on the spray-liquid drops in a horizontal counter-current spray column. The liquid was sprayed via a streamed-centrifugal atomizer which provided a cone-shaped stream of droplets. The interface was

found to be affected by three major factors – gas velocity, liquid rate and drop diameter. The results were correlated in terms of two equations: one was valid for gas velocities in the spray column lower than 4 m/s, the other one for gas velocities between 4 and 8 m/s. The values of the multiple correlation coefficients for the two equations approached unity.