

Odpylanie mokre w skruberze ze zderzającymi się strumieniami

*Bogumiła Wrzesińska, Sylwia Witman
Politechnika Warszawska*

1. Wprowadzenie

W wielu procesach technologicznych związanych z ochroną atmosfery pojawia się problem oczyszczania gazów z zanieczyszczeń stałych. Znanych jest wiele metod separacji pyłu ze strumienia gazowego, wykorzystujących różne mechanizmy odpylania i aparaturę. Pyły wydzielane są z gazu w wyniku zderzenia cząstek z powierzchnią kolektora. Kolektorami mogą być powierzchnie płaskie, cylindryczne, kuliste oraz elementy o nieregularnych kształtach. Zderzenie cząstki z powierzchnią kolektora następuje w wyniku bezpośredniego zaczepienia, pod wpływem sił grawitacji, bezwładności, dyfuzyjnych lub elektrostatycznych [1].

Odpylanie gazów można realizować metodami suchymi lub mokrymi. Odpylanie suche prowadzone jest w odpylaczach grawitacyjnych (np. w komorach pyłowych), uderzeniowo-inercyjnych, odśrodkowych (np. w cyklonach, multicyklonach, odpylaczach wirowych), filtracyjnych (z filtrami tkaninowym, warstwowymi, włóknistymi, ziarnistymi) oraz elektrofiltrach.

Odpylanie mokre polega na wydzieleniu cząstek aerozolowych z zapyłonego gazu podczas kontaktu z cieczą. Faza ciekła spełnia tu rolę bezpośredniego kolektora. Strumień cieczy przepływający przez odpylacz (najczęściej tę rolę spełnia woda) niezależnie od tego czy jest w postaci kropeł, warstewek, czy strug usprawnia efekt wydzielenia, zwiększając tym samym sprawność odpylania. W skruberach natryskowych, strumieniowych, odśrodkowych, mechanicznych oraz Venturiego bazuje się na natrysku w postaci kropeł bądź strug. W skruberach z wypełnieniem odpalenie odbywa się na strugach lub warstewkach cieczy.

Odpylanie mokre jest jednym z bardziej efektywnych i często stosowanych procesów. Do jego zalet można zaliczyć:

- wysoką sprawność,
- nieskomplikowaną zwartą konstrukcję i co za tym idzie niewielki wydatek inwestycyjny na instalację,
- małe prawdopodobieństwo pożaru bądź eksplozji nawet podczas pracy z niebezpiecznymi materiałami,
- małe ryzyko wtórnego zapylenia bądź wydostania się cząstek aerozolu do środowiska,
- możliwość zmiany nawilżenia lub obniżenia temperatury gazu,
- niewielką zależność sprawności od wielkości urządzenia odpylającego,
- możliwość jednoczesnego prowadzenia procesów wymiany masy (np. absorpcji zanieczyszczeń gazowych).

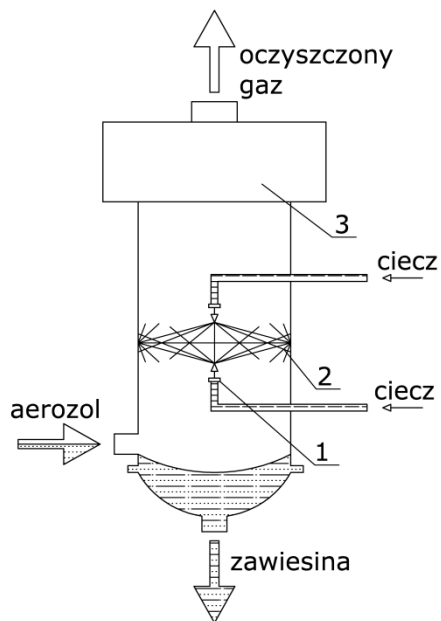
Główne wady odpylaczy mokrych związane z doprowadzeniem strumienia cieczy do aparatu to:

- konieczność prowadzenia gospodarki ściekowej, separacji lub utylizacji powstającej zawiesiny,
- zwiększone zużycie mocy związane z przetłaczaniem cieczy,
- konieczność stosowania materiałów odpornych na korozję,
- potrzeba separacji kropeł z gazów odlotowych.

2. Skruber ze zderzającymi się strugami

Skruber zbudowany jest z cylindrycznej kolumny o średnicy 0,2 m i wysokości 0,5 m. Wlot strumienia gazu o rozmiarach 0,06 x 0,04 m jest umieszczony u dołu kolumny, stycznie w stosunku do ścianki bocznej. W górnej części aparatu umieszczona jest dodatkowa komora cylindryczna o zwiększonej średnicy, która spełnia funkcję odkraplacza zatrzymując porwane przez strumień gazu nieliczne kropelki cieczy. Schemat odpylacza mokrego ze zderzającymi się strumieniami cieczy przedstawiono na rys. 1.

W skruberze zainstalowane są współosiowo dwie dysze strumieniowe w odległości 0,2 m. Dysze generują strugi cieczy, które po zderzeniu pod kątem 180° tworzą warstwę kropeł, poruszających się w kierunku ścian aparatu. Po zderzeniu ze ścianką krople ulegają koalescencji i w postaci warstewki spływają na dno skrubera, jednak część kropeł ulega wtórej atomizacji i porusza się w kierunku osi aparatu. Warstwa kropeł rozpylonych w całym przekroju korpusu aparatu tworzy strefę zraszania. Cząstki aerozolu zderzając się z kolektorami cieczowymi, w wyniku działania mechanizmu bezwładnościowego i efektu bezpośredniego zaczepienia, tworzą zawiesinę spływającą grawitacyjnie po ściankach aparatu [2, 3].



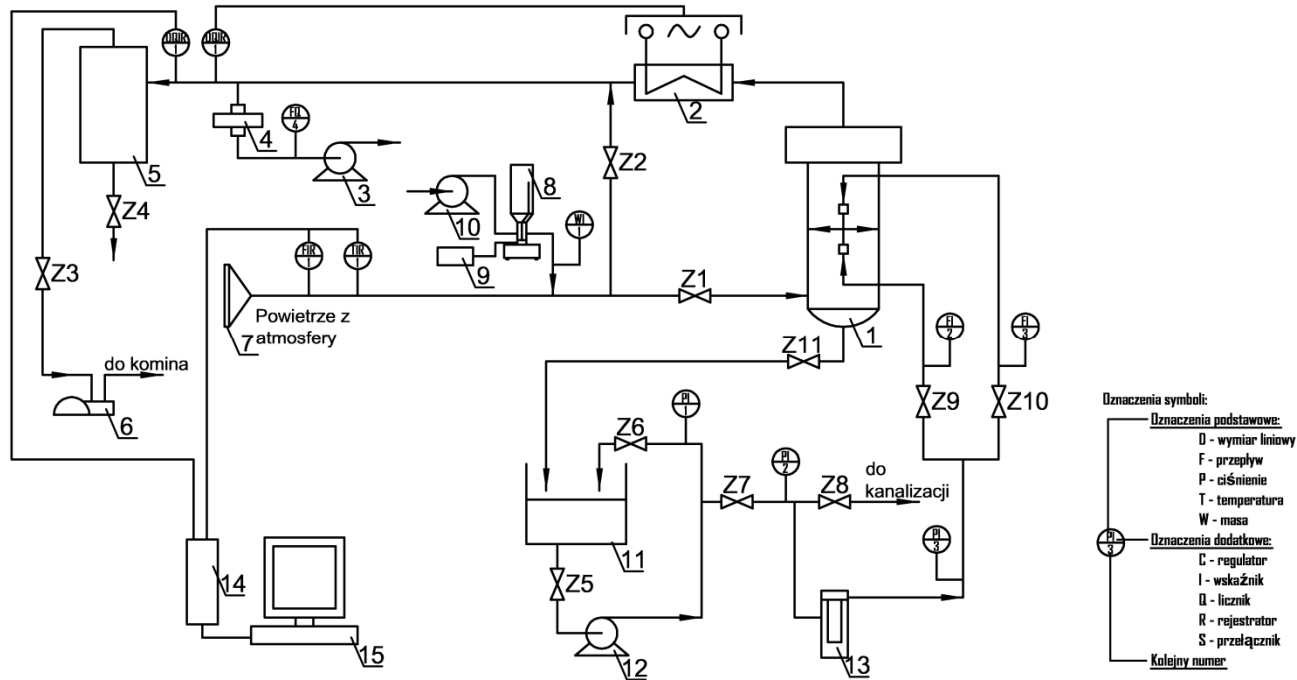
Rys. 1. Budowa skrubera
Fig. 1. Scrubber construction

Strumień aerozolu wprowadzany jest do skrubera przez wlot umiejscowiony stycznie do ściany aparatu. Taka konstrukcja pozwala na wykorzystanie energii gazu do generowania siły odśrodkowej i powstania promieniowej składowej prędkości cząstek pyłu. Zapyłony gaz wprowadzany jest w ruch wirowy, co ułatwia wydzielenie cząstek ciała stałego na skutek zderzenia ze ściankami aparatu. W skruberze można wyodrębnić 3 strefy oczyszczania gazu:

1. dolna część aparatu - strefa wstępnego wydzielenia cząstek pyłu w wyniku zderzenia wirującego strumienia ze ściankami aparatu i kroplami wtórnymi,
2. środkowa część aparatu - strefa wydzielenia cząstek pyłu na kroplach pierwotnych,
3. górna część aparatu - strefa wydzielenia cząstek pyłu w wyniku zderzenia ze ściankami aparatu i kroplami wtórnymi (analogicznie do części dolnej). Strefa ta pełni również rolę odśrodkowego separatora kropeł porywanych strumieniem gazu.

3. Badania doświadczalne

Badania doświadczalne odpylania gazu przeprowadzono na stanowisku doświadczalnym, którego schemat budowy przedstawiono na rys. 2. Głównym elementem instalacji badawczej jest skruber ze zderzającymi się strumieniami cieczy (1).



Rys. 2. Schemat instalacji do badawczej; 1 – skruber, 2 – zagrzewacz, 3 – pompa zasysająca, 4 – filtr mierniczy, 5 – zbiornik, 6 – sprężarka, 7 – filtr powietrza, 8 – pojemnik dozownika pyłu, 9 – silnik z regulatorem prędkości mieszadła, 10 – pompa, 11 – zbiornik wody obiegowej, 12 – pompa, 13 – filtr wody, 14 – układ elektroniczny, 15 – komputer

Fig. 2. Scheme of the experimental set-up; 1 – scrubber, 2 – heater, 3 – pump, 4 – metering filter, 5 – tank, 6 – compressor, 7 – air filter, 8 – dust container, 9 – engine with the mixer speed governor, 10 – pump, 11 – water circulating tank, 12 – pump, 13 – water filter, 14 – electronic unit, 15 – PC computer

Obieg powietrza jest wymuszony przez sprężarkę (6). Powietrze zasysane jest z atmosfery i po oczyszczeniu na filtrze (7) oraz zapyleniu kierowane jest do skrubera (1). Po odpyleniu gaz przepływa przez zagrzewacz (2), gdzie następuje odparowanie niewydzielonych wcześniej kropeł cieczy. Następnie poprzez zbiornik buforowy (5) gaz zasysany jest przez sprężarkę. Możliwe jest również skierowanie zapyłonego gazu bezpośrednio do zbiornika (5) z pomięciem skrubera.

Pył jest dozowany do układu z pojemnika wykonanego z tworzywa sztucznego (8). Pojemnik jest zaopatrzony w mieszadło, którego prędkość obrotowa jest zadawana przez silnik krokowy z regulatorem obrotów (9). Pył z dozownika jest porywany strumieniem powietrza wymuszonym pompką membranową (10) i mieszany z głównym strumieniem gazu. Tak przygotowany aerozol jest kierowany do skrubera.

Woda krąży w obiegu zamkniętym. Woda ze zbiornika wody obiegowej (11) po filtracji na filtrze świecowym (13) jest dostarczana do skrubera przez pompę śrubową (12). Strumień cieczy rozdzielany jest na dwie strugi, które zasilają dysze w skruberze. Zawiesina zebrana w dolnej części odpylacza przez zamknięcie hydrauliczne sphywa grawitacyjnie do zbiornika (11).

Na rys. 2 przedstawiono punkty, w których zainstalowano przyrządy kontrolno-pomiarowe. Najistotniejszym z punktu widzenia badania sprawności odpylania jest pomiar stężenia pyłu w powietrzu. Do jego określenia wykorzystano laserowy licznik cząstek IPS-WB firmy Kamika Instruments. Analizator składa się z: czujnika cząstek (DQIR-1), czujnika temperatury (TIR-1), zwężki pomiarowej (FIR-1), elektronicznego bloku pomiarowego (14) oraz komputera PC z odpowiednim oprogramowaniem (15). Pomiar polega na wykorzystaniu „dyfrakcji laserowej” dla najmniejszych cząstek oraz zmian strumienia promieniowania rozproszonego dla cząstek dużych. Strumień promieniowania laserowego w podczerwieni pozwala na identyfikację wielkości cząstek oraz precyzyjne określenie ich ilości. Analizator jest urządzeniem automatycznym pracującym on-line w zakresie średnic cząstek 0,5÷500 μm, klasyfikowanych w 256 klasach pomiarowych. Licznik cząstek wykorzystano do pomiaru stężenia pyłu zarówno strumieniu wlotowym do skrubera, jak i gazie odpylonym. Przełączenie miejsca poboru próbki do analizy odbywa się za pomocą zaworów Z-1 i Z-2.

Opcjonalnie pomiaru stężenia cząstek w strumieniu gazu można dokonać przy zastosowaniu układu pomiarowego składającego się z filtra mierniczego (4), pompy zasysającej (3) i gazomierza (FQ-4).

Pomiar sprawności odpylania polegał na porównaniu stężenia cząstek w gazie przed i po odpyleniu. Sprawność frakcyjną η_i obliczano wg zależności:

$$\eta_i = \left(1 - \frac{c_{i2}}{c_{i1}}\right) \cdot 100\% \quad (1)$$

gdzie:

c_{i1} i c_{i2} – stężenie cząstek o średnicy d_i odpowiednio na wlocie i wylocie z odpylacza.

Sprawność ogólną wyznaczano z zależności:

$$\eta = x_i \eta_i \quad (2)$$

gdzie:

x_i – ułamek zawartości frakcji o średnicy cząstek d_i .

4. Wyniki badań

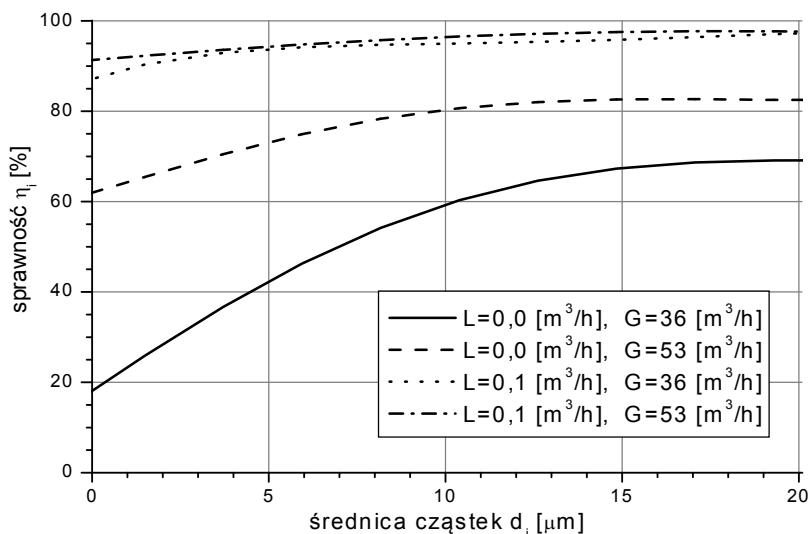
Badania doświadczalne odpylania przeprowadzono dla pyłu krzemionkowego SiO₂ SIPERNAT 350 (Degussa). Z obserwacji mikroskopowych wynika, że cząstki pyłu mają kształt zbliżony do kuli. Wyznaczono średnie średnice cząstek: arytmetyczną 8,1 μm, powierzchniową 9,4 μm, objętościową 10,7 μm, Sautera 13,8 μm i geometryczną 6,7 μm. Rozkład frakcyjny pyłu odniesiony do udziałów masowych odpowiada linii „wlot” na rys. 4. Badany pył krzemionkowy jest higroskopijny (wilgotność po ekspozycji na powietrzu wynosiła ok. 5,5%_{mas.}), co utrudniało jego dozowanie do układu. W związku z tym przed rozpoczęciem badań pył suszono przez 2 h w temperaturze ok. 100°C. Aerosol poddawany odpylaniu był rozcieńczony, maksymalne stężenie pyłu nie przekraczało 0,02 g/m³. Można więc założyć brak oddziaływań pomiędzy cząstkami ciała stałego.

Badania odpylania przeprowadzono dla różnych przepływów gazu i cieczy temperaturze otoczenia 22÷25°C. Strumień gazu zmieniano w zakresie 36÷72 m³/h, co odpowiada prędkościom wlotowym do skrubera 4,2÷8,3 m/s i prędkościom odniesionym do przekroju całego aparatu 0,32÷0,64 m/s. W zastosowaniach przemysłowych korzystne jest stosowanie wyższych prędkości gazu, zarówno ze względu na wyższą sprawność odpylania, powodowaną głównie zwiększeniem siły odśrodkowej, jak i zmniejszenie gabarytów aparatów. Zakres prędkości stosowany w niniejszej pracy pozwalał na zobrazowanie działania obu mechanizmów odpylania tzn. osadzania pyłu na kroplach i osadzania odśrodkowego na ściankach skrubera. Poza tym przy dużych prędkościach gazu maleje dokładność pomiarów sprawności odpylania z powodu porwania kropli z aparatu. Stosowanie większych prędkości wymaga stosowania skutecznych odkraplaczy. Strumień wody zmieniano od 0 (odpylanie suche) do 0,1 m³/h w przeliczeniu na jedną dyszę. Przykładowe wyniki badań przedstawiono na rys. 3÷5.

W przypadku odpylania suchego skrubier działa jak odpylacz wirowy odśrodkowy. Cząstki pyłu wydzielane są na ściankach aparatu w wyniku działania siły odśrodkowej. Z obserwacji wizualnych wynika, że strumień gazu wykonuje w aparacie ok. 2 wirów. Sprawność odpylania jest niewielka i w du-

zym stopniu zależy od prędkości gazu. Na rys. 3 porównano sprawności dla dwóch wielkości strumienia gazu 36 i 53 m³/h. Wpływ prędkości gazu na sprawność jest największy dla cząstek małych. Pomiary wykonano w aparacie o wstępnie zwilżonych ściankach, a czas pomiaru był krótki. Można więc założyć, że pył osadzony na ściankach nie był wtórnie unoszony z aparatu.

W przypadku odpylania mokrego wpływ prędkości gazu jest niewielki, szczególnie dla dużych strumieni wody, co wynika z innego mechanizmu odpylania. Cząstki pyłu usuwane są zarówno w wyniku zderzeń ze ściankami aparatu, jak i zderzeń z kroplami cieczy. Dodatkowo ścianki skrubera są stale obmywane wodą, co zapobiega wtórnemu zapyleniu. Na rys. 3 pokazano linie dla dużego przepływu cieczy, $L=0,1$ m³/h na jedną dyszę, i różnych przepływów gazu. Osiągane są sprawności rzędu 90% dla cząstek o średnicy $d_f=1$ μm, aż do ponad 97% dla cząstek największych. Obie linie niemal się pokrywają, a więc prędkość gazu ma w tym przypadku niewielkie znaczenie.

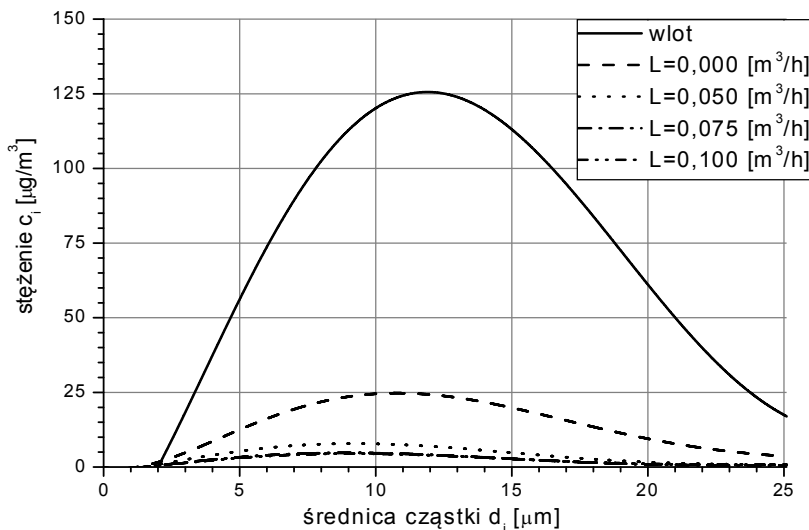


Rys. 3. Porównanie odpylania suchego i mokrego
Fig. 3. Comparison of the dry and wet dust removal

Większy wpływ na sprawność odpylania ma ilość, rozmiar i prędkość kropeł cieczy. Wymienione parametry nie były badane doświadczalnie, ale z rozważań teoretycznych wynika, że dominujący wpływ na sprawność ma prędkość kropeł [4]. Porównanie wyników badań dla stałej prędkości gazu i różnych strumieni cieczy przedstawiono na rys. 4 i 5. Wzrost natężenia przepływu wody wypływającej z dysz prowadzi do zwiększenia prędkości i zmniejszenia rozmiarów generowa-

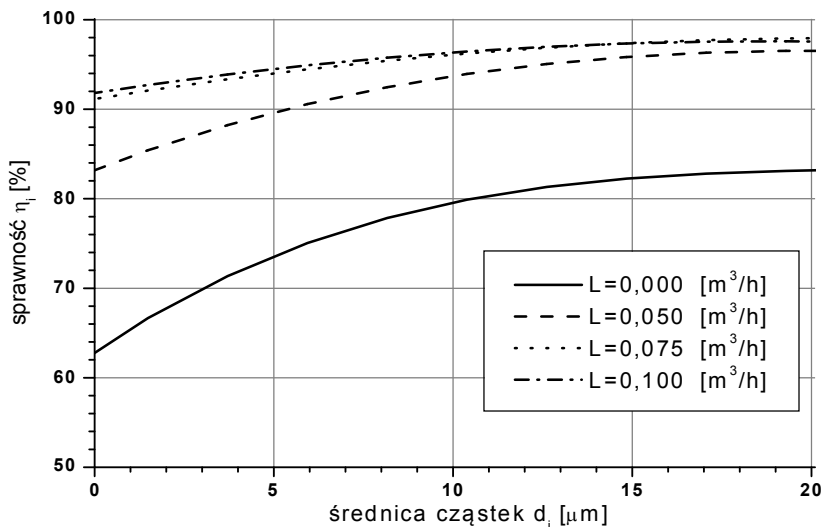
nych kropeł pierwotnych i wtórnych. Konsekwencją jest wzrost względnej prędkości cząstek pyłu i kolektorów cieczowych i lepsza sprawność odpylania.

Zwiększenie strumienia wody prowadzi do wzrostu sprawności, zwłaszcza dla cząstek małych, których skuteczność usuwania podczas odpylania suchego jest niewielka. Zraszanie gazu nawet małą ilością wody, $L=0,05 \text{ m}^3/\text{h}$, powoduje znaczący wzrost sprawności w stosunku do odpylania suchego.



Rys. 4. Rozkład wielkości cząstek w strumieniu wlotowym i wylotowym, $G=53 \text{ m}^3/\text{h}$
Fig. 4. Dust particle size distribution in inlet and outlet streams, $G=53 \text{ m}^3/\text{h}$

Oszacowano również wielkość strumienia cieczy porywanej z aparatu. W badanym zakresie przepływów strumień ten w niewielkim stopniu zależał od prędkości gazu oraz cieczy i nie przekraczał wartości $0,035 \text{ g}/\text{h}$. Aby strumień porywanej wody nie zakłócał pomiarów stężenia pyłu przez licznik cząstek krople były usuwane z gazu przez odparowanie w zagrzewaczu (2) – rys. 2. Dla niewielkich przepływów gazu skuteczność odparowania była wyższa niż 95%. Dla przepływów gazu powyżej $50 \text{ m}^3/\text{h}$, ze względu na krótki czas przebywania w zagrzewaczu malała do ok. 50%.



Rys. 5. Zależność sprawności odpylania od strumienia cieczy, $G=53 \text{ m}^3/\text{h}$

Fig. 5. Dust removal efficiency as a function liquid stream, $G=53 \text{ m}^3/\text{h}$

5. Podsumowanie i wnioski

Odpylanie gazów w skruberze ze zderżającymi się strumieniami cieczy jest procesem efektywnym. Sprawność frakcyjna usuwania cząstek pyłu krzemionkowego osiągała wartości rzędu 92% dla cząstek o średnicy $1 \mu\text{m}$ do ponad 95% dla cząstek powyżej $10 \mu\text{m}$.

Sprawność odpylania mokrego zależy głównie od wielkości strumieni cieczy zasilających dysze, a w mniejszym stopniu od szybkości gazu. Wysoka sprawność jest skutkiem zderzeń cząstek stałych z szybko poruszającymi się kroplami, które są generowane w wyniku zderzenia dwóch strumieni cieczy wypływających z naprzeciwległych dysz. Dodatkowo wykorzystano siłę odśrodkową do nadania cząstkom aerozolu prędkości promieniowej. Cząstki, które zderzyły się ze ściankami aparatu były zmywane wodą, co zapobiegało wtórnemu zapyleniu. Wirowy ruch strumienia gazu zwiększał sprawność odpylania, jak i skuteczność odkraplania w górnej części skrubera.

Literatura

1. **Warych J.:** *Oczyszczanie przemysłowych gazów odlotowych*. WNT, Warszawa, 1994.
2. **Warych J., Batkowski B.:** *Procesy jednostkowe w środowisku zderzających się strumieni gazów*. Inż. Aparat. Chem., 29, 14-19, 1998.
3. **Kowalczyk D., Warych J.:** *Odpylanie gazu w skruberze odśrodkowym ze zraszaniem zderzeniowym*. Inż. Aparat. Chem., 1, 16-20, 2008.
4. **Batkowski B.:** *Odpylanie wirującego strumienia aerozolu w środowisku zderzających się strumieni cieczy*. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, 2002.

Wet Dust Removal in a Scrubber with the Colliding Streams

Abstract

Dust removal is an important problem in many technological processes and atmosphere protection. One of the methods of solid particle separation is the wet dedusting. The results of the experimental investigations of dust removal in a scrubber with colliding liquid streams are presented in this paper.

Two mechanisms of dust separation are considered. Thanks to the scrubber geometry, aerosol particles are casted off from the rotating air stream to the wet walls of cylindrical apparatus using centrifugal forces. Additionally the particles collides with the water droplets by reason of the inertial forces. The droplets are generated due to the collision of two liquid streams at an angle 180°.

The whirling movement of gas and the liquid spraying were used to eliminate silica dust from the air stream. The scrubber construction, experimental set-up, methods of measurement and results are described.

The effect of air and liquid flow rates on the aerosol removal effectiveness was studied. It was determined that, the wet dust removal efficiencies ranged from ca. 92% for 1 μm particles to above 95% for 10 μm particles. The removal efficiency depends mainly on the water flow rate. The dry separation efficiency depends strongly on the gas flow rate. It was possible to remove 60% of the small particles and ca. 80% of the biggest particles.

Efficiency of wet dust removal depends mainly on the size of streams of liquid feeding nozzles, an in smaller degree on gas velocity. High efficiency is a result of collisions of solid particles with water drops moving quickly, which are generated during collision of two streams of liquid flowing out from nozzles placed opposite each other. Additionally centrifugal force was used for imparting aerosol particles radial velocity. Particles which collided with the walls of the device were washed by water. This prevented secondary dusting. Whirling movement of gas stream increased dedusting efficiency, and efficiency of water drops removal in the upper part of the scrubber.