

R.G. GREEN, S.H. FOO, M.S. BECK

Department of Instrumentation
and Analytical Science, The University
of Manchester, Institute of Science
and Technology

J.G. PHILIPS

Central Electricity Generating
Board, Eggborough Power Station

M. LECH

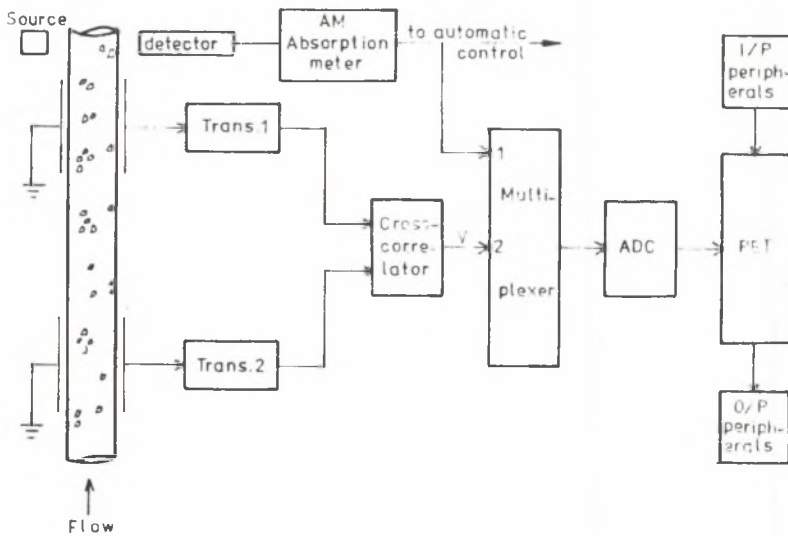
Instytut Techniki Ciepłej i Mechaniki
Płynów Politechniki Wrocławskiej

WYKORZYSTANIE POMIARU PRZEPŁYWU PYŁU WĘGLOWEGO DLA POLEPSZENIA PRACY KOTŁÓW PAROWYCH

Streszczenie. Proponowany system przeznaczony jest do pomiaru prędkości przepływu i strumienia masy pyłu transportowanego pneumatycznie. Pojemnościowe przetworniki usytuowane są w rurociągu transportującym. Sygnały wyjściowe z tych przetworników wykorzystywane są do obliczenia w układzie korelacyjnym średniej prędkości przepływu pyłu. Koncentracja pyłu w przekroju pomiarowym mierzona jest przy użyciu metody absorpcji jonizującego promieniowania beta. Sygnały proporcjonalne do prędkości i koncentracji pyłu podawane są do mikrokomputera, który oblicza masowe natężenie przepływu pyłu i podaje wyniki obliczeń. Mikrokomputer podaje również sygnały ostrzegające, gdy masowe natężenie przepływu różni się znacznie od wartości zadanej.

1. Wprowadzenie

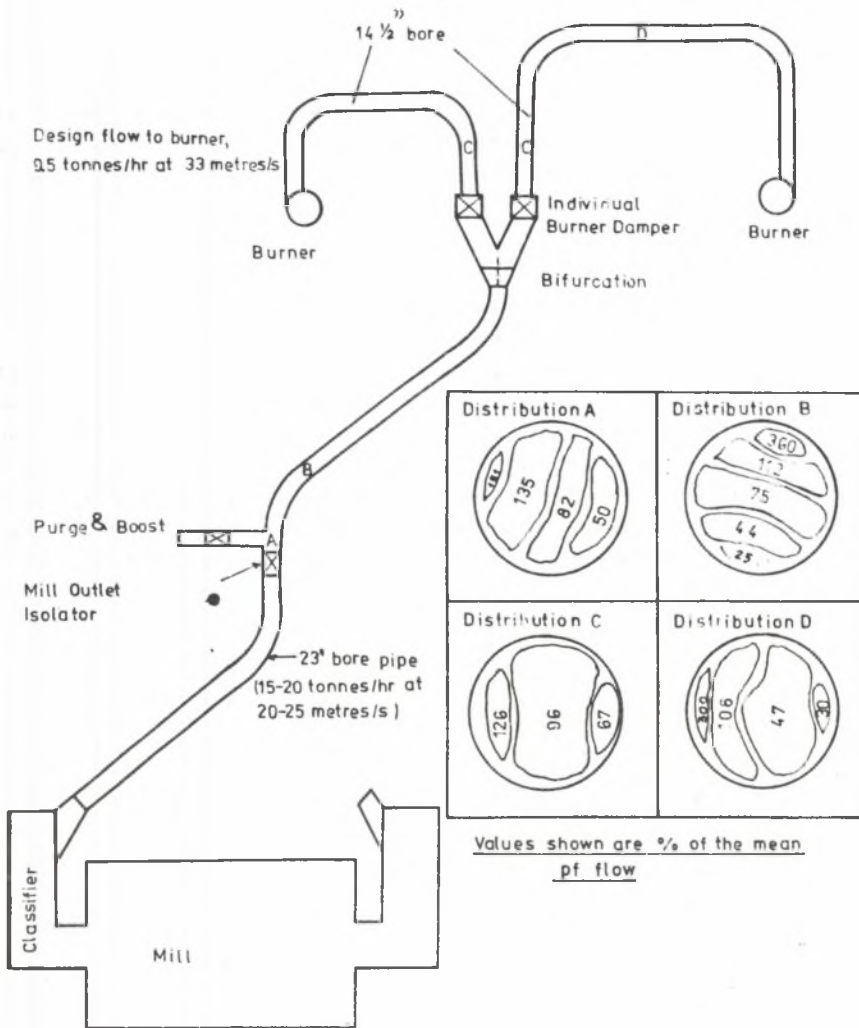
System komputerowy on-line przeznaczony jest do optymalizacji procesu spalania paliwa węglowego w kotłach elektrowni zawodowych. Umożliwia on realizację równomiernego rozpyłu pyłu do każdego z 24 palników kotła parowego, jak również daje ostrzeżenie o początku zatykania się przewodu transportującego. Ponadto system kontroluje koncentracje pyłu w mieszaninie pyłowo-powietrznej podawanej do każdego palnika. Stwarza to możliwość realizacji automatycznej stabilizacji tego parametru, a przez to zapewnienie spalania z małym nadmiarem powietrza prowadzącym do zwiększenia efektywności spalania. System składa się z dwóch przetworników pojemnościowych, korelatora układu do pomiaru osłabienia promieniowania beta, ze-



Rys. 1. Schemat blokowy systemu pomiarowego

społu interface, mikrokomputera PET i jego zespołów peryferyjnych. Schemat blokowy systemu podano na rys. 1. Pomijając problem zmienności podawania paliw i prędkości transportowej trzeba wspomnieć o efekcie tworzenia się smugi zwiększonej koncentracji pyłu występującego wzdłuż odcinka transportowego rurociągu. Smuga taka powstaje wskutek separacji zachodzącej w przepływającej mieszaninie. Przyjmuje ona zwykle postać linii śrubowej, co powoduje, że rozkład koncentracji w przekroju jest nieregularny. Narzuca to konieczność odpowiedniej konstrukcji zarówno czujników pojemnościowych służących do pomiaru prędkości przepływu, jak i rozwiązanie układu do pomiaru koncentracji pyłu. Innym problemem pojawiającym się niezależnie od efektu "smugi" jest zatykanie się rurociągu. Następuje ono zwykle przy małych prędkościach transportowych w odcinkach poziomych rurociągu. Smuga zwiększonej koncentracji pod wpływem sił tarcia o ścianki rury lokalizuje się w dalszej części przekroju rurociągu. Przy małych prędkościach przepływu warstwa pyłu narasta zmniejszając przekrój przepływowy. Opory hydrauliczne transportu rosną stwarzając warunki dla dalszej separacji i odkładania się pyłu, w ten sposób dochodzi do zatkania przewodu transportującego. Wniknięcie płomienia do rury po jej zatkanie może być przyczyną eksplozji.

Opisany system stwarza możliwość wczesnego ostrzegania o tworzeniu się zatkania pyłowego. Polega on na śledzeniu wyglądu korelogramu, a ponadto na śledzeniu wartości koncentracji i prędkości przepływu. System podaje sygnał ostrzegawczy, gdy wartość koncentracji wzrośnie ponad wartość kry-



Rys. 2. Instalacja do mielenia i transportu pneumatycznego pyłu

tyczną, jak również gdy prędkość przepływu zmaleje poniżej zadanej prędkości krytycznej transportu, przy której następuje separacja pyłu ze strumienia mieszaniny.

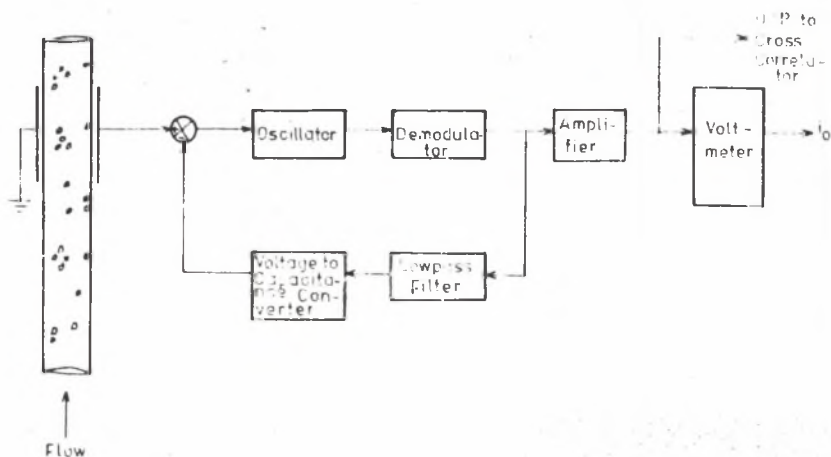
Rysunek 2 pokazuje schematycznie układ młyna i instalacji transportowej z uwzględnieniem rozkładu przepływu w przekrojach rurociągów we wskazanych punktach instalacji.

2. Pomiar prędkości przepływu

Średnia prędkość przepływu pyłu mierzona jest za pomocą metody korelacyjnej, przy wykorzystaniu sygnałów pochodzących z przetworników pojemnościowych zainstalowanych wprost na rurociągu transportowym.

2.1. Przetwornik pojemnościowy

Przetwornik pojemnościowy, przedstawiony na rys. 3, składa się z dwóch głównych sekcji, zwanych elektrodami i układu elektronicznego. Wygląd elektrod i ich wymiary zależą od zastosowania. Zasadniczo przetwornik składa się z kondensatora uformowanego płasko ze ściankami rurociągu transportowego, co zapewnia przepływ czynnika bez zwiększonych oporów przepływu. Przetwornik pojemnościowy połączony jest równoległe z indukcyjnością tworząc zastrojony obwód elektryczny dla oscylatora tranzystorowego. Częstotliwość oscylacji zmienia się wraz ze zmianą pojemności elektrody, która zmienia się na skutek zmian przepływu. Zintegrowany obwód demodulatora zamienia tę zmianę częstotliwości na zmianę napięcia, która zawiera składniki zależne od średniego natężenia przepływu, fluktuacji pochodzących od



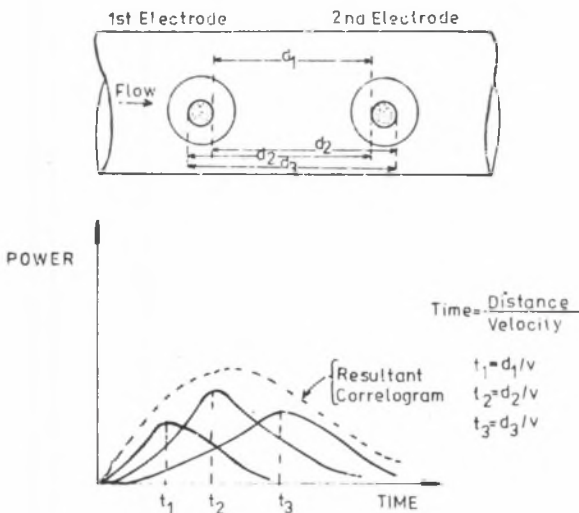
Rys. 3. Schemat blokowy przetwornika pojemnościowego

turbulencji, tzw. szum przepływu, osadu na elektrodzie lub oprawie elektrody, zmiany własności elektrycznych układu itp. Z tych zmian tylko szum przepływu wykorzystany jest do formowania sygnału końcowego korelatora. Pozostałe zmiany są kompensowane przez powolne zmiany napięcia na przetworniki pojemnościowe, co powoduje regulację oscylatora częstotliwości zapewniając zachowanie optymalnych punktów pracy przetworników [1].

Schemat blokowy przetwornika pojemnościowego pokazany jest na rys. 3.

2.1.1. Elektroda

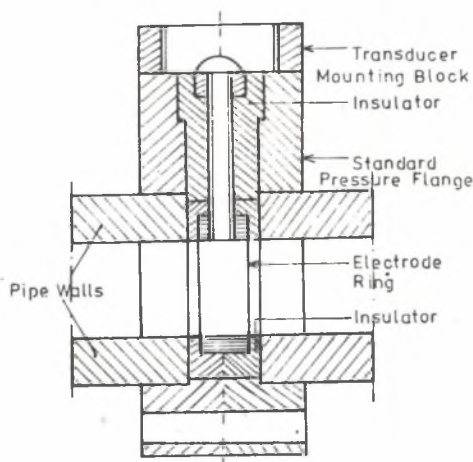
Początkowo pomiar prędkości przepływu realizowano przy użyciu elektrod o średnicy ok. 100 mm zamontowanych w ścianki rurociągu w sposób podany na rys. 4. Stosowanie takich elektrod okazało się niekorzystne ze względu na oddziaływanie zmiany położenia lub kształtu wspomnianej już smugi zwiększonej koncentracji pyłu na wielkość sygnału z przetwornika, przy stałej



Rys. 4. Sposób zainstalowania elektrod i odpowiadający temu korelogram

średniej wartości natężenia przepływu. Drugą niekorzystną cechą tego typu elektrod jest ich duży wymiar powodujący płaski kształt korelogramu (rys. 4) i w efekcie trudność w ustaleniu dokładnej wartości czasu przepływu strumienia pomiędzy dwoma elektrodami. Użycie w pomiarach elektrody pierścieniowej eliminuje wspomniane niekorzystne cechy. Wykonana jest ona w formie pierścienia obejmującego przepływ, o średnicy wewnętrznej równej średnicy wewnętrznej rury transportowej. Elektroda odizolowana jest od ścianki rury, a ich wzajemna odległość wynosi 4 mm.

Elektroda wmontowana jest w odcinek odizolowany od pozostałej instalacji rurociągu stanowiący sekcję pomiarową. Przekrój sekcji pokazano na rys. 5. Pierścieniowa elektroda dobrze uśrednia przepływ z całego przekroju przepływowego, a ponadto nie jest ona czuła na przemieszczenie i wygląd smugi zwiększonej koncentracji pyłu lub inne nieprawidłowości rozkładu pyłu w przekroju rurociągu [2]. Korelogram otrzymany z elektrody pierścieniowej jest wysoki i ma wyraźny pik, co wydatnie wpływa na dokładność pomiaru czasu przepływu strumienia [3].



Rys. 5. Przekrój typowej elektrody pierścieniowej

2.2. Korelator

Korelator porównuje sygnały z dwóch przetworników i oblicza czas przepływu pomiędzy tymi przetwornikami [4].

Funkcja korelacji jest zdefiniowana przez:

$$R_{xy}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t - \tau) y(t) dt \quad (1)$$

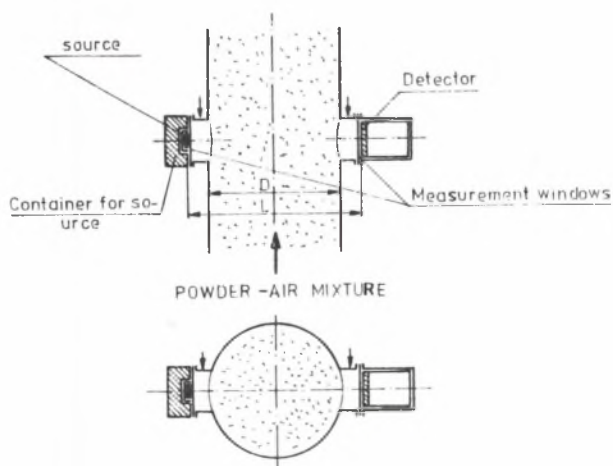
Funkcja ta posiada maksymalną wartość, gdy opóźnienie korelacji τ jest równe czasowi przepływu strumienia τ^* pomiędzy dwoma elektrodami. Jeśli l jest odległością pomiędzy elektrodami, wówczas prędkość przepływu u oblicza się z zależności:

$$u = \frac{l}{\tau^*} \quad (2)$$

Wygląd korelogramów może być wykorzystany do wczesnego wykrywania początków zatkania rurociągu [5]. Korelogram o ostrym pikie wskazuje, że wazyłki przepływające cząstki posiadają zbliżoną prędkość. W miarę postępującej separacji pyłu ze strumienia różnice prędkości cząstek wzrastają, co uwiadcza się spłaszczeniem krzywej. W przypadku chwilowego zablokowania rurociągu korelogram jest zupełnie płaski. Porównywanie przez komputer wyglądu korelogramu badanego ze wzorcowym pozwala na wyprowadzenie sygnału ostrzegającego o początku zatykania rury transportowej.

3. Pomiar koncentracji pyłu

Pomiar koncentracji pyłu węglowego w mieszaninie pyłowo-powietrznej realizowany jest przez pomiar osłabienia promieniowania beta przenikającego strumień przepływającej rurociągiem mieszaniny. Zasadę pomiaru ilustruje rys. 6. Źródło promieniowania beta umieszczone jest w ścianie rurociągu. Naprzeciw źródła umieszczony jest detektor promieniowania. Źródło emituje cząstki beta, które uformowane w wiązkę przenikają strumień przepływającej mieszaniny. Ze względu na znacznie większą ok. 10^3 razy gęstość ciała stałego w porównaniu z gęstością gazu powstanie się ciała stałego w formie pyłu w gazie powoduje znaczne osłabienie wiązki promieniowania, co uwiadcza się zmniejszoną liczbą cząstek beta docierających do detektora promieniowania w jednostce czasu.



Rys. 6. Sposób zainstalowania źródła promieniowania i detektora na rurociągu

Energia docierających do detektora cząstek beta zamieniana jest w detektorze na impulsy elektryczne. Sygnał z detektora w postaci impulsowej przekazywany jest do aparatury AM, gdzie ulega całkowaniu i przetworzeniu. Sygnał wyjściowy, proporcjonalny do koncentracji pyłu Y, przekazywany jest do mikrokomputera PET (rys. 1) lub może być wykorzystany do sterowania procesem. W przyrządzie zastosowano źródło promieniowania kryptonu 85 w postaci gazu zamkniętego w szczelnej obudowie. Maksymalna energia cząstek beta emitowanych z tego źródła wynosi 0,66 MeV, zapewniając dobrą czułość pomiaru. Krypton jest pierwiastkiem chemicznie obojętnym, co zwiększa bezpieczeństwo jego użycia. Czas połowicznego rozpadu jest długi i wynosi 10,6 roku, gwarantując długi okres eksploatacji jednego źródła promieniowania.

3.1. Geometria radioizotopowego układu pomiarowego

Geometria układu pomiarowego posiada duży wpływ na własności miernicze przyrządu. Zwykle ujmuje ona wzajemny stosunek średnicy wiązki promieniowania do jej długości liczonej od źródła promieniowania do detektora. Dla wąskiej wiązki promieniowania stosunek ten jest mały, zaś dla szerokiej duży. Szerokość wiązki formuje się za pomocą kalibratorów umieszczonych przed źródłem i detektorem promieniowania.

Jak wspomniano poprzednio, rozkład koncentracji pyłu w przekroju rurociągu nie jest ustabilizowany, lecz zmienia się w czasie. Zmiana rozkładu koncentracji pyłu przy stałej wartości średniej koncentracji wpływa na zmianę osłabienia promieniowania beta, a więc na wynik pomiaru. Badania tego problemu opisane w pracy [5] dowiodły, że zależność ta jest większa dla wąskiej wiązki promieniowania i w miarę zwiększenia szerokości wiązki maleje. Zauważono, że osłabienie promieniowania zależy również od średnicy cząstek pyłu i że zależność ta jest znów większa dla wąskiej wiązki promieniowania i w miarę zwiększenia szerokości wiązki maleje. Zauważono, że osłabienie promieniowania zależy również od średnicy cząstek pyłu i że zależność ta jest znów większa dla wąskiej wiązki promieniowania i większej średnicy cząstki. W miarę wzrostu szerokości wiązki zmniejsza się wyraźnie współczynnik osłabienia promieniowania, co powoduje zmniejszenie czułości pomiaru, równocześnie wzrasta liczba rejestrowanych cząstek jonizujących powodując zmniejszenie błędu statycznego związanego z przypadkowym charakterem rozpadu promieniotwórczego. Wybór szerokości wiązki promieniowania zależy w każdym przypadku od specyfiki zastosowania.

3.2. Detektor promieniowania

Pośród znanych detektorów promieniowania poszukiwano detektora nieczułego na zmiany temperatury pracy i napięcia zasilającego, o możliwie małym czasie martwym, dużej wydajności detekcji i stabilności pracy oraz żywotności. Często stosowany detektor scyntylacyjny posiada dużą zależność sygnału wyjściowego od temperatury pracy i zmian napięcia zasilają-

cego. Zastosowanie specjalnego układu stabilizacyjnego wiąże się ze zmniejszeniem niezawodności przyrządu w warunkach przemysłowych. Licznik Geigera-Millera posiada dość długi czas martwy, co wydatnie ogranicza częstość detekcji i prowadzi do dużych błędów statystycznych, ponadto żywotność liczników GM jest mała. Użycie komory jonizującej wiąże się z koniecznością zapewnienia dużego strumienia cząstek na detektorze, a więc z dużą aktywnością zastosowanego źródła promieniowania. Maksymalna aktywność źródła promieniowania z jednej strony uzależniona jest od profilu produkcyjnego producenta i zwykle ograniczona do aktywności jednej porcji 100 mci, zaś z drugiej strony względami ochrony radiologicznej. W przyrządzie zastosowano krzemowy półprzewodnikowy detektor promieniowania Si(Li). Zapewnia on stosunkowo dużą wydajność detekcji i stabilności pracy przy krótkim czasie martwym i małej zależności sygnału wyjściowego od temperatury i warunków zasilania. Żywotność detektora krzemowego jest duża i wynosi średnio 10^{13} .

3.3. Inne aspekty radioizotopowego pomiaru koncentracji pyłu

Spośród wielu aspektów pomiaru należy wspomnieć o wyborze miejsca pomiaru, które powinno być usytuowane na ustabilizowanym przepływie, tzn. że wszystkie cząstki powinny osiągnąć prędkość graniczną, zaś stosunek prędkości średniej cząstki pyłu W_p do prędkości średniej gazu W_g powinien być stały. Warunki termodynamiczne przepływu powinny być również ustalone. Daje to możliwość łatwego przejścia od mierzonej koncentracji lokalnej Y_L , tzn. stosunku masy pyłu m_p do masy gazu m_g w jednostce objętości mieszaniny, do koncentracji transportowej Y_T wyrażającej stosunek przetransportowanej masy pyłu M_p do masy transportującego gazu M_g , jakiego przepływają przez przekrój rurociągu A w jednostce czasu:

$$Y_T = \frac{M_p}{M_g} = \frac{A W_p m_p}{A W_g m_g} = Y_L \frac{W_p}{W_g} \quad (3)$$

Innym zagadnieniem jest wybór średnicy odcinka rurociągu do realizacji pomiaru. Badania problemu transmisji promieniowania beta wykonane przez [6] wykazały, że przy danej szerokości wiązki promieniowania i aktywności źródła promieniowania wraz ze wzrostem średnicy rurociągu wzrasta współczynnik osłabienia, co prowadzi do zwiększenia czułości i dokładności pomiaru. Jednocześnie jednak obserwuje się zmniejszenie strumienia cząstek beta rejestrowanych przez detektor, które prowadzi do zwiększenia błędu statystycznego. Wpływ drugiego czynnika jest zwykle przeważający, co upoważnia do stwierdzenia ogólnego, że pomiar koncentracji powinien być prowadzony na rurociągach o małych średnicach.

Należy również wspomnieć, że pewien wpływ na współczynnik osłabienia promieniowania posiada rodzaj materiału, z którego jest wykonany pył, a zwłaszcza stosunek jego liczby atomowej Z do masy atomowej M . Trudno rów-

niez nie wspomnieć o problemach wpływu filtracji promieniowania na wynik pomiaru oraz o znaczeniu kolimacji wiązki i zewnętrznego układu elektro-
nicznego na własności miernicze przyrządu.

4. Pomiar strumienia masy pyłu

Pomiar strumienia masy pyłu oparty jest na zależności definicyjnej (3)

$$M_s = M_g Y_L = A W_g \rho_g Y_L \frac{W_s}{W_g} A Y_L W_s \rho_g \quad (4)$$

gdzie:

A - przekrój przepływowy rurociągu,

ρ_g - gęstość gazu.

Wychodząc z definicyjnego równania na koncentrację lokalną:

$$Y_L = \frac{m_s}{m_g} = \frac{m_s}{V_g \rho_g} \quad (5)$$

gdzie: V_g jest objętością gazu w jednostce objętości mieszaniny oraz ko-
rzystając z równania (4), otrzymamy

$$M_s = A \frac{m_s}{V_g} W_s \quad (6)$$

Przy gęstości rzeczywistej pyłu ok. 10^3 razy większej od gęstości ga-
zu, dla koncentracji pyłu w zakresie 0-10 kg pyłu/kg gazu objętość mie-
szaniny V_{sg} jest w przybliżeniu równa V_g ($V_s \ll V_g$), i jest stała przy
stałej geometrii układu pomiarowego. Zatem równanie (6) można przedstawić
w postaci:

$$M_s = K m_s W_s$$

Stała K ujmuje wielkość przekroju przepływowego oraz wielkości związane
z układem pomiarowym. Stałą K wyznacza się doświadczalnie. Jak wspom-
niano, W_s mierzone jest za pomocą metody korelacyjnej, zaś m_s za pomocą
metody absorpcji promieniowania beta. Strumień masy pyłu obliczany jest
przez mikrokomputer.

5. Mikrokomputer PET i jego interface

Mikrokomputer PET otrzymuje konieczne dane z przetworników, korelatc-a
oraz wprowadzone przez sterującego. Sygnały proporcjonalne do koncentra-
cji pyłu i czasu przepływu wprowadzone są do PET przez interface. Wielko-

ści stałe, jak np. odległość pomiędzy przetwornikami, średnica rurociągu itp., wymagane przez komputer wprowadzone są ręcznie.

Interfejs PET SET1 łączy system pomiarowy z PET. Składa się on z 16 kanałów, 8 bloków analogowych do przetworników cyfrowych AIM16; PET MOD, który łączy AIM16 z IEEE oraz z pulpitem sterowniczym. Informacje użytkownika (D ϕ - D7) są używane jako sygnały z AIM16 do PET, podczas gdy informacje IEEE (DI ϕ 1 - DI ϕ 8) są używane jako sygnały z PET do AIM16. Instrukcja POKK uruchamia AIM16 i zapoczątkowuje przetwarzanie wybranego kanału z analogu na formę cyfrową, zaś instrukcja PEEK służy do wczytywania danych do komputera.

W celu ostrzegania i kontroli sygnały wyjściowe przesyłane są przez IEEE lub pulpit sterowniczy z PET poprzez przetworniki cyfrowo-analogowe do elementów wykonawczych takich, jak np. zawór lub do systemu alarmowego.

Z zebranych danych PET oblicza chwilowe masowe natężenie przepływu. Obliczone parametry porównywane są ze zbiorem punktów. Sygnały korekcyjne przesyłane są do odpowiednich urządzeń sterowania dla zachowania wymagań tego zbioru.

Wygląd korelogramu może także być wyświetlany dla kontroli przepływu i wykrywania początku zatkania rurociągu. W ten sposób odpowiednio szybko mogą być podjęte odpowiednie środki zaradcze.

6. Zakończenie

Realizacja ciągłego pomiaru masowego natężenia przepływu pyłu w każdym przewodzie dostarczającym pył do palników daje możliwość ciągłej kontroli rozdziału pyłu na poszczególne palniki przyczyniając się do wzrostu stabilności i podwyższenia sprawności kotła parowego. Oszacowano, że sprawność kotła, bloku energetycznego o mocy 500 MW wzrośnie ok. 0,50%, co pozwoli na zaoszczędzenie paliwa za ok. 250 000 £ w skali rocznej. System poprzez wczesne wykrywanie zatkania przewodu przyczynia się do znacznego zmniejszenia prawdopodobieństwa eksplozji a przez to do poprawy niezawodności pracy bloku energetycznego i zmniejszenia kosztów koniecznych remontów. Ponadto przez równomierny rozdział paliwa uzyskuje się równomierne obciążenie komory paleniskowej, poprawę stabilności pracy oraz zmniejszenie erozji i korozji powierzchni ogrzewanych. System daje również możliwości udoskonalenia układu automatycznego sterowania blokiem przez wykorzystanie sygnałów chwilowej ilości podawanego paliwa.

LITERATURA

- [1] Green R.G.: Frequency modulated transducers for gas/solids flow measurement, MSc Thesis, University of Bradford, 1974.

- [2] Green R.G.: Capacitance flow transducers for multiphase system, PhD Thesis pending, University of Bradford, 1981.
- [3] Shackleton M.E.: MSc Thesis pending, University of Bradford, 1981.
- [4] Beck M.S.: Correlation in instruments: Cross-correlation flowmeters. J. Phys: Sci. Instrum., Vol. 14, pp. 7-19.
- [5] Lech M.: Radioizotopowy pomiar koncentracji pyłu w mieszaninie pyłowo-powietrznej przepływającej rurociągiem zamkniętym. Praca doktorska. Politechnika Wrocławska, Wrocław 1973.
- [6] Lech M.: Zależność błędu radioizotopowego pomiaru koncentracji pyłu transportowanego pneumatycznie, od średnicy odcinka pomiarowego rurociągu. Materiały konferencyjne, IV Transport and sedimentation 1980.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ РАБОТЫ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

Резюме

Предлагаемая система предназначена для измерения скорости и массы струи пыли при пневмотранспорте. Ёмкостные преобразователи находятся в транспортирующем трубопроводе. Выходные сигналы этих преобразователей используются для определения средней скорости потока пыли в корреляционном устройстве. Концентрация пыли в измерительном сечении измеряется при использовании метода поглощения ионизирующего излучения бета. Сигналы пропорциональные скорости и концентрации пыли подаются в микрокомпьютер, который вычисляет весовой расход потока пыли и печатает результаты вычислений. Микрокомпьютер выдает также предупредительные сигналы в случае, когда весовой расход потока значительно отличается от заданного.

FLOW MEASUREMENT FOR OPTIMISING THE FEEDRATE OF PULVERISED FUEL TO COAL FIRED BOILERS

Summary

A system is proposed which is designed to measure the velocity and also provides an output which is a function of the mass flow rate of airborne particles. Capacitance transducers are formed into the 370 mm ($14\frac{1}{2}$ inch) diameter pipes feeding the injectors of a 500 MW coal fired boiler. These transducers sense the instantaneous changes in concentration of dielectric material within their sensing fields. The outputs of two transducers are used to obtain the average velocity of the powdered fuel by cross-correlation. The concentration is measured by B ray absorption. The velocity and concentration signals are fed into a microcomputer which calculates and displays the instantaneous mass flow rate, it will also produce warning signals when the measured feedrates deviate significantly from their desired set point values. Outputs suitable for controlling the feedrate are available.