ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1987

Seria: ENERGETYKA z. 100 Nr kol. 919

Jerzy ROKITA
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechniki Śląskiej

Jerzy KMIECIK, Sławomir TOMASZEWSKI
Południowy Okręg Energetyczny - Katowice

KOMPLEKSOWA TECHNOLOGIA ODPROWADZANIA I SKŁADOWANIA POPIOŁÓW LOTNYCH I ŻUŻLI W POSTACI GĘSTEJ ZAWIESINY W WODZIE

Streszczenie: Istota technologii polega na stosowaniu gęstej zawiesiny popiołów lotnych w wodzie o wysokim udziale fazy stałej charakteryzowanym stosunkiem masowym wynoszącym co najmniej 1 kg popiołów/1 kg wody. Scharakteryzowano parametry i właściwości gęstych zawiesin popiołowo-wodnych. Omówiono instalacje do programowanego wytwarzania zawiesin popiołowo-wodnych o założonym składzie. Wskazano na ważniejsze zagadnienia dotyczące transportu rurociągowego i składowania zawiesin w postaci zestalonej masy.

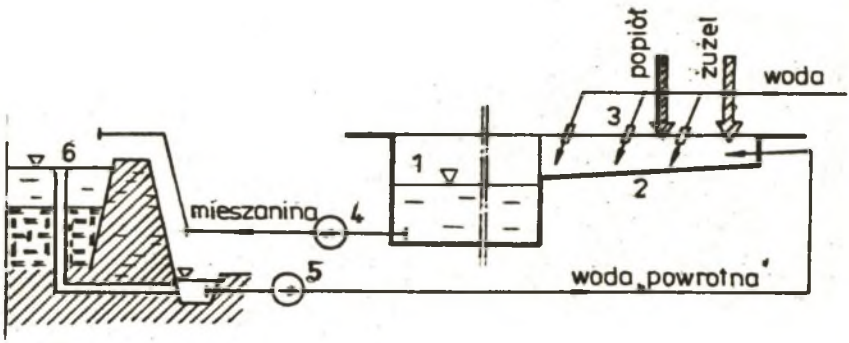
1. Wprowadzenie

Problem odprowadzania i późniejszego deponowania popiołów lotnych i żużli powstających w procesie spalania węgla kamiennego lub brunatnego (zwłaszcza w elektrowniach i elektrociepłowniach) jest nieprzerwanie przedmiotem zainteresowania w energetyce krajowej i światowej. Dowodzi tego duża liczba publikacji i patentów, zwłaszcza z okresu ostatnich lat.

Problem ten jest szczególnie wyraźnie dostrzegany w Polsce, ponieważ w krajowej energetyce zawodowej i przemysłowej wykorzystywane są prawie wyłącznie węgle kamienne i brunatne, o wysokim stopniu zapopielenia. Wypady popiołów lotnych i żużli są więc szczególnie duże, w odniesieniu do jednostki wytwarzanej energii, a także są bardzo wysokie w skali globalnej (około 20 mln ton rocznie), w poszczególnych zaś elektrowniach wynoszą 2-8 tys.ton na dobę. Wprawdzie prawie połowa globalnego wypadu odpadów jest zagospodarowywana, jednakże około 10 mln ton musi być deponowane na składowiskach (obecnie głównie terenowych).

Odpady paleniskowe odprowadzane są na składowiska najczęściej rurociągami w strumieniu wody. Rozwiązania instalacji mają tę wspólną cechę, że stosunkowo rzadka mieszanina popiołowo-wodna spływa do zbiornika bagrowego, skąd pompy odśrodkowe tłoczą ją rurociągami na składowiska terenowe blisko położone. Mieszanina powstaje w różny sposób i przy wykorzystaniu różnego rodzaju aparatów (np. spłucznych) i urządzeń (np. ejektorów). W instalacjach starszych stosunek masy fazy stałej do wody jest niski i wynosi 1 kg odpadów/(20-30) kg wody. W instalacjach nowszych wskutek uściślenia dyscypliny technologicznej, stosunek ten nieco wzrasta i wynosi 1 kg odpadów/(10-20) kg wody.

Główną przyczyną występowania tak znacznych nadmiarów wody, jest wprowadzanie strumieni wody pobudzających przepływ mieszaniny w kanałach, w których występuje przepływ grawitacyjny. Schemat ideowy typowego układu odprowadzania odpadów paleniskowych przedstawiono na rysunku 1



Rys. 1. Schemat ideowy typowego układu odprowadzania popiołów lotnych i żużli. Oznaczenia: 1 - zbiornik bagrowy, 2 - kanał spływowy, 3 - dysze natryskowe, 4 - pompa mieszaniny, 5 - pompa wody powrotnej, 6 - składowisko mokre.

W ostatnich latach w Polsce próbowano podnieść zagęszczenie mieszaniny, mieszając popioły lotne z wodą w trakcie grawitacyjnego przepływu w szczelnej rynnie [8]. Przewidywane proporcje miały wynosić około 0,4 kg popiołów/1 kg wody, jednakże w praktyce nie uzyskano (z różnych zresztów względów) oczekiwanych efektów.

W WRL jest ostatnio propagowane rozwiązanie polegające na wytwarzaniu mieszaniny o składzie wagowym 1 kg popiołu/(3-4) kg wody w specjalnym przepływowym urządzeniu mieszającym (tzw. Hydromix) [1]. Zamierza się skojarzyć go ze znanym systemem "podwójnych" dawkowników rurowych [2].

Bardzo zwykle rzadka mieszanina popiołów lotnych (i ewentualnie żużli) z wodą, kierowana jest na składowiska otwarte, gdzie następuje sedymentacja fazy stałej, zaś znaczne ilości sklarowanej wody nadosadowej odprowadza się do ponownego wykorzystania w elektrowni. Konieczne są więc odrębne instalacje pompowe obiegu "powrotnego". Składowisko nadpoziomowe musi być obwałowane (jako budowla hydrotechniczna) oraz zdrenowane, aby ułatwić odprowadzenie wody nadosadowej. Składowisko powinno być odpowiednio uszczelnione, aby zabezpieczyć glebę i ewentualne zasoby wód podziemnych przed przenikaniem zanieczyszczeń rozpuszczonych w wodzie, a pochodzących z odpadów paleniskowych. Znane metody uszczelniania składowisk polegające na wykonywaniu powłok i ekranów iłowych, stosowaniu powłok foliowych i asfaltowych czy też wykładzin na bazie szkła wodnego są jednak bardzo kosztowne, a w przypadku powłok foliowych - nietrwałe. Inne problemy stwarza sama eksploatacja składowisk. Po odprowadzeniu wody i wyschnięciu pozostałości, zdeponowane odpady pozostają w stanie luźnym i wywołują pylenie składowisk, co jest wysoce uciążliwe dla otoczenia.

Przeciwdziałanie pyleniu polegające na utrzymywaniu zwaru w stanie wilgotnym jest mało skuteczne, zaś tworzenie powłok ochronnych (np. asfaltowych) jest kosztowne i przynosi efekty krótkotrwałe.

Zarysowany kompleks zagadnień związanych z hydraulicznym transportem i późniejszym składowaniem odpadów paleniskowych dowodzi konieczności usprawniania i zmieniania istniejącego stanu.

2. Koncepcja technologii "gęstej" zawiesiny

W latach 1978-79 została opracowana nowa kompleksowa technologia odprowadzania i składowania odpadów paleniskowych z elektrowni, elektrociepłowni i ciepłowni [9,10,11]. Jej istota polega na stosowaniu specjalnie wytwarzanej zawiesiny popiołów lotnych w wodzie o dużym udziale fazy stałej (popiołów lotnych) w zawiesinie. Do zawiesiny tej w razie potrzeby mogą być także wprowadzane nieutylizowane żużle energetyczne, a także i inne stałe odpady elektrowniane (piryty, łupki, odpady młynowe) w ilości do około 30 % w stosunku do masy zawiesiny. Stosunek wagowy popiołów lotnych do wody w zawiesinie powinien wynosić co najmniej 1 kg popiołów lotnych/1 kg wody, korzystne zaś jest gdy jest on większy i wynosi (1,5-2,5) kg popiołów lotnych/1 kg wody. Zawiesinę taką przetłacza się rurociągami na składowisko i poddaje sezonowaniu. Po pewnym okresie (zwykle 7-10 dni) zawiesina zestala się w masę stałą o pewnej wytrzymałości na ściskanie (zwykle większej od 50 kPa) i znikomej przepuszczalności dla wody (współczynnik przepuszczalności zwykle mniejszy od 1.10^{-6} m/s). W miarę dalszego upływu czasu wytrzymałość masy na ściskanie wzrasta (może sięgać nawet 300 kPa i wyżej), zaś współczynnik przepuszczalności maleje. Ogólnie biorąc wytrzymałość na ściskanie wzrasta, a współczynnik przepuszczalności zmniejsza się w miarę zwiększania się stosunku wagowego popiołów lotnych do wody.

Warto podkreślić, że dotychczas uważano, iż popioły lotne z węgla kamiennego (krzemianowe i glinowe) samodzielnie nie wiążą lub co najwyżej zbrylają się, zaś stają się zdolne do tworzenia hydratów dopiero w połączeniu z aktywizatorami. Jak więc widać, poglądy te były niesłuszne.

3. Parametry zawiesin popiołów lotnych w wodzie

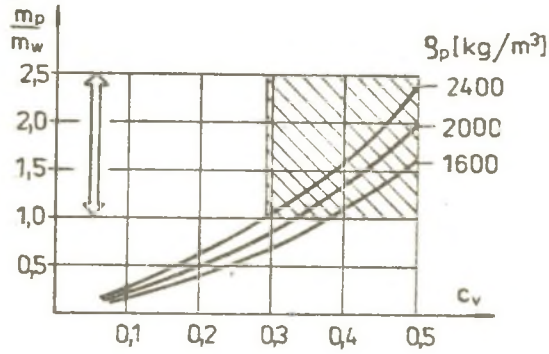
Parametrami zawiesiny, które mają wpływ na rozwiązanie i eksploatację układu odprowadzania i składowania odpadów paleniskowych w postaci gęstej zawiesiny w wodzie są przede wszystkim: gęstość, lepkość, trwałość i zdolność powodowania erozyjnego zużycia urządzeń. Zależą one od składu zawiesiny. Skład zawiesiny można scharakteryzować znanymi pojęciami, jak:

- koncentracja masowa (udział masowy fazy stałej w zawiesinie) - c_M,
- koncentracja objętościowa (udział objętościowy fazy stałej w zawiesinie) - c_V,
- stosunek masowy popiołów lotnych do wody - m_p/m_w.

Między tymi pojęciami występują następujące związki:

$$c_M = \frac{1}{1 + \left(\frac{m_p}{m_w}\right)^{-1}} \qquad (1)$$

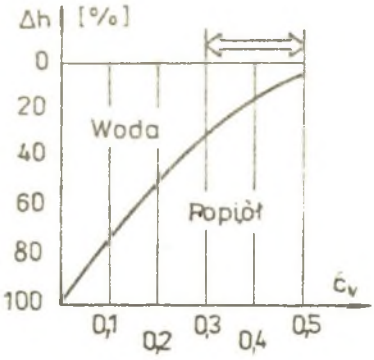
$$c_v = \frac{\rho_w}{\rho_p} \frac{c_M}{1 - c_M \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_p}\right)} \qquad (2)$$



Rys. 2. Stosunki masowe popiołów lotnych do wody w zależności od koncentracji objętościowej popiołów lotnych różniących się gęstością

Pojęcie koncentracji objętościowej jest najbardziej dogodne do określania składu zawiesiny, gdyż nie zależy ono od gęstości faz. Gęstość popiołów lotnych jest zróżnicowana i występuje w przedziale ρ_p = = 1600-2500 kg/m^3. Tym samym wartościom koncentracji objętościowej odpowiadają różne stosunki masowe popiołów lotnych do wody, w zależności od gęstości popiołów lotnych (rys. 2).

Aby zilustrować wpływ koncentracji objętościowej na zagęszczenie mieszaniny popiołowo-wodnej, na rysunku 3 przedstawiono procentowo wysokość warstwy wody nadosadowej, która tworzy się po wysedymentowaniu popiołów w warstwie mieszaniny o stałej wysokości. Ze wzrostem c_v wysokość warstwy wody nadosadowej maleje, a przy $c_v > 0,4$ staje się ona praktycznie znikoma (ze względu na potrzebę jej odprowadzania poza teren składowiska).



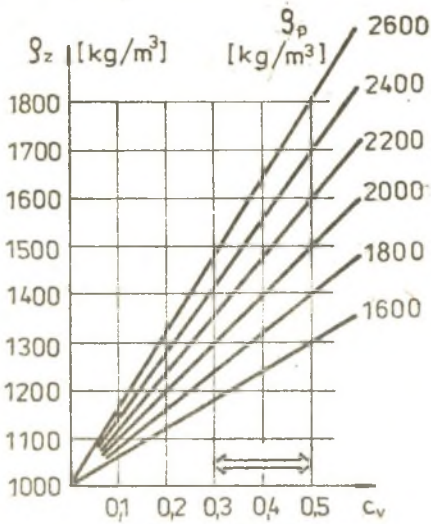
Rys.3. Wysokość warstwy wody nadosadowej w zależności od początkowej koncentracji objętościowej popiołów lotnych w mieszaninie (procentowo)

Gęstość zawiesiny jest liniowo zależna od koncentracji objętościowej

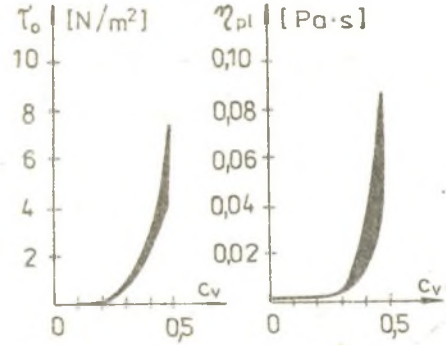
$$\rho_z = \rho_w + c_v (\rho_p - \rho_w) \qquad (3)$$

i może zmieniać się w dość szerokich granicach (rys. 4).

Lepkość zawiesiny popiołów lotnych w wodzie (które są substancją pylistą - jakkolwiek ich skład granulometryczny jest zróżnicowany) zależy od c_v, jednakże nawet przy c_v = const może ona zna-



Rys. 4. Gęstości zawiesin popiołów lotnych w wodzie

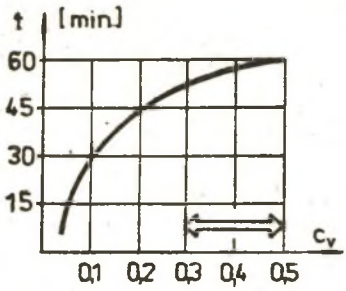


Rys. 5. Zakres zmienności stałych reologicznych τ_o i η_{pl} w modelu Binghama, dla zawiesin popiołowo-wodnych (z różnych popiołów lotnych)

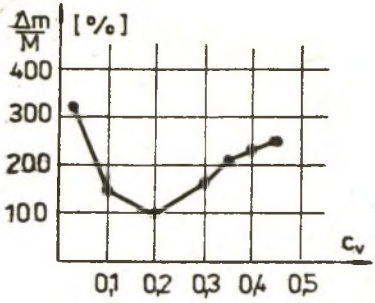
cznie różnić się w zależności od popiołów. W zakresie $c_v < 0,14-0,16$ zawiesiny mają właściwości cieczy newtonowskich - o lepkościach wzrastających w miarę zwiększania się c_v. Gdy $c_v > 0,14-0,16$ w zawiesinach ujawniają się właściwości ciała plastyczno-lepkiego (Binghama). Zakres zmienności stałych reologicznych τ_o i η_{pl} (w równaniu Binghama) przedstawiono w zależności od koncentracji objętościowej na rysunku 5. Wprawdzie odnoszą się one do konkretnych warunków pomiaru (reometr rotacyjny, niezmienna szerokość szczeliny), jednak widać, że zmiany wartości stałych reologicznych mogą być bardzo znaczne. Są one bez wątpienia spowodowane zróżnicowaniem składu granulometrycznego oraz kształtu ziaren i stanu ich powierzchni; ujęcie tych wpływów nie wydaje się być obecnie możliwe.

Trwałość zawiesiny jest tym parametrem, który ma wpływ na osadzanie się popiołów w zbiornikach retencyjnych i rurociągach, w sytuacji gdy nastąpi przerwa w agitacji zawiesiny lub w jej przepływie. Zależy ona od prędkości opadania ziaren popiołu, które odbywa się w warunkach skrępowania. Prędkość opadania maleje ze wzrostem c_v. Czasy całkowitego wysedymentowania zawiesin (rys. 6) są stosunkowo długie, gdy $c_v > 0,2$; co jest korzystne ze względu na pewność działania układu. Z dotychczasowych doświadczeń eksploatacyjnych wiadomo, że krótkie przerwy w pracy pomp zawiesiny nie powodują trudności eksploatacyjnych. Dłuższa przerwa w działaniu instalacji może jednak stworzyć warunki dla zainicjowania procesów wiązania popiołów, a to może uniemożliwić wprowadzenie wysedymentowanej mieszaniny w stan przepływu.

Zdolność powodowania erozyjnego zużycia urządzeń w porównywalnych warunkach zwiększa się wraz ze wzrostem koncentracji objętościowej popiołów. Jednakże jeżeli rozpatrywać ubytki masy urządzeń w odniesieniu do łącznej masy prze-



Rys.6. Czas sedymentacji popiołów w rurociągu o średnicy 150 mm w zależności od początkowej koncentracji objętościowej popiołów (pochodzących z Elektrowni "Łagisza")



Rys. 7. Stosunek ubytku masy urządzeń Δm do łącznej masy M przepompowanego popiołu (w ujęciu względnym)

pompowanego popiołu, to okazuje się, że wzrost c_v powoduje początkowo zdecydowany spadek, a następnie relatywnie wolniejszy wzrost takiego wskaźnika [4,5] (rys. 7). Widać więc, że łączny ubytek masy urządzeń, wywołany erozyjnym oddziaływaniem zawiesiny popiołowo-wodnej jest znacząco mniejszy w przypadku transportowania hydraulicznego "gęstej" zawiesiny w porównaniu z instalacją tradycyjną o takiej samej przepustowości fazy stałej.

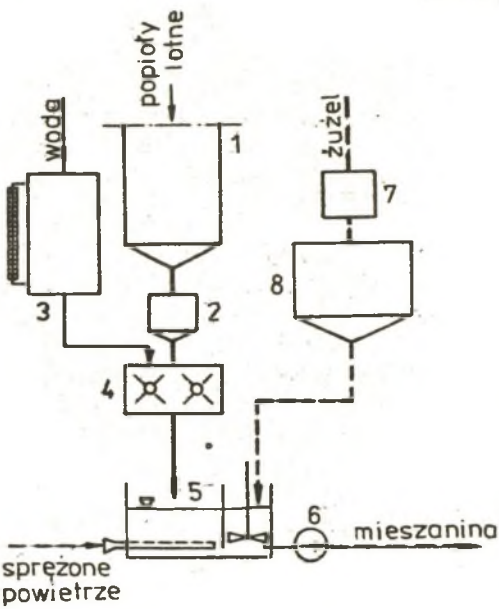
4. Wytwarzanie gęstej zawiesiny popiołów lotnych w wodzie jako proces programowany

Ponieważ parametry zawiesiny (zwłaszcza wysoko skoncentrowanej) zależą bardzo silnie od zawartości fazy stałej, przeto konieczne jest utrzymywanie stałości składu zawiesiny. Stałość składu zawiesiny pozwala utrzymać niezmienność parametrów transportu rurociągowego, a także uzyskać odpowiednie własności zestalonej masy na składowisku.

Popioły lotne wykazują właściwości liofobowe, a wobec małych rozmiarów ziaren mieszanie ich z wodą jest utrudnione. Dlatego też opracowano rozwiązania instalacji umożliwiających wytwarzanie zawiesiny o stałym udziale popiołów lotnych w zawiesinie.

4.1. Wytwarzanie zawiesiny o stałym udziale masowym popiołów lotnych

Największą dokładność składu masowego zawiesiny uzyskuje się, gdy wytwarzana ona jest porcjowo w cyklach powtarzających się [9]. Instalację realizującą taki proces przedstawiono schematycznie na rysunku 8.
Suche popioły lotne odbierane są pneumatycznie spod elektrofiltrów i przenoszone są w strumieniu powietrza do zasobnika popiołów lotnych 1. Zasobnik ten musi być wyposażony w urządzenia do odpylania powietrza transportującego popiół, korzystne jest zastosowanie w nim aeracji popiołów, co gwarantuje ich swobodne osypywanie się w stronę otworów wysypowych. Popioły lotne z zasobnika 1 doprowadzane są do dozownika wagowego 2, w którym odważana jest



Rys.8. Schemat instalacji do wytwarzania w procesie periodycznym zawiesiny popiołów lotnych w wodzie o stałej koncentracji masowej popiołów lotnych (c_M = const)

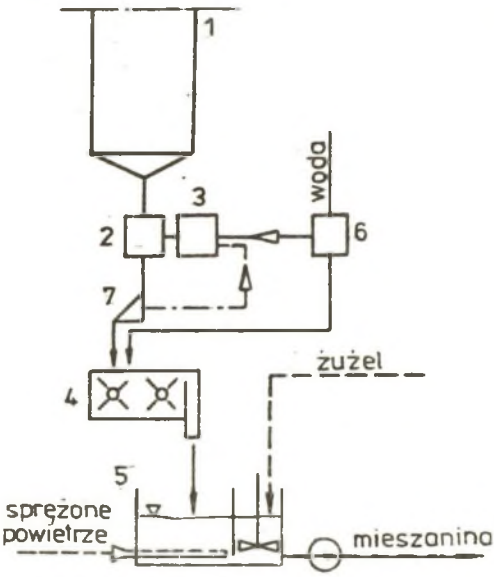
stosowna masa popiołów. Popioły z dozownika wagowego 2 wraz z odmierzoną w zbiorniku namiarowym 3 stosowną ilością wody przemieszczają się grawitacyjnie do mieszarki 4. Mieszarka 4 posiada co najmniej dwa ułopatkowane poziome wały, obracające się z prędkością 40-100 obr/min w kierunkach przeciwnych, prędkość obwodowa końców łopatek powinna być nie mniejsza niż 2 m/s. Wówczas mieszanie jest dostatecznie intensywne i w ciągu 2-3 minut wytworzona zostaje porcja quasijednorodnej zawiesiny. Z mieszarki 4 zawiesina spływa do zbiornika retencyjnego 5. Ze zbiornika retencyjnego 5 pompa zawiesiny 6 czerpie zawiesinę i przetłacza rurociągiem tłocznym na składowisko lub do miejsca jej odbioru. W zbiorniku retencyjnym 5 stosuje się agitację zawiesiny, aby utrzymać fazę stałą w stanie zawieszenia (barbotaż powietrzny lub mieszadła mechaniczne). Do instalacji doprowadza się spod komory paleniskowej kotła żużel, granulowany w kruszarce 7. Może on być w razie potrzeby przejściowo magazynowany w zbiorniku żużla 8. Żużel dozuje się do zbiornika retencyjnego 5 w pobliżu wlotu rurociągu dopływowego pompy 6, korzystnie do wydzielonej części zbiornika 5. Do rozprowadzania i utrzymywania żużla w stanie zawieszenia służy odrębne mieszadło.
Instalacja zbliżona do opisanej została wykonana i funkcjonuje w Elektrowni "Łagisza" (na razie bez doprowadzania żużli do zawiesiny). Sporządza się i przetłacza rurociągiem o średnicy 168 mm zawiesinę o składzie 2 kg popiołów/ 1 kg wody. Długość rurociągów wynosi 1,4 km bądź 2,9 km w zależności od miejsca zrzutu zawiesiny. Stosowane są z powodzeniem jednostopniowe pompy wirowe typu PH-150 (na dalszą odległość w połączeniu szeregowym, w systemie "in line").

Godząc się z występowaniem pewnych fluktuacji składu masowego zawiesiny w czasie, można zaproponować rozwiązanie instalacji realizującej wytwarzanie zawiesiny o stałym udziale masowym popiołów, w procesie nieprzerywanym [14]. Schemat takiej instalacji przedstawiono na rysunku 9.
Popioły lotne z zasobnika popiołów 1 są doprowadzane poprzez dozownik popiołów 2 (wyposażony w regulator 3 natężenia strumienia) do mieszarki 4, połączonej poprzez przelew ze zbiornikiem retencyjnym 5 zawiesiny.

Do mieszarki doprowadzany jest także strumień wody o zadanym regulatorem 6 natężeniu przepływu. Natężenie masowe strumienia popiołów jest proporcjonalne do natężenia strumienia wody, zaś czujnik 7 natężenia masowego strumienia popiołów sprzężony jest z regulatorem natężenia strumienia popiołów. Natężenie strumienia wody ustala się stosownie do poziomu zawiesiny w zbiorniku retencyjnym. Pojemność mieszarki musi być tak ustalona, aby średni czas przebywania składników w mieszarce wynosił około 90 sekund. Zbiornik retencyjny i układ odprowadzania mieszaniny (z ewentualnie doprowadzonymi żużlami) nie zmienia się w porównaniu z instalacją według rysunku 8.

4.2. Wytwarzanie zawiesiny o stałym udziale objętościowym popiołów lotnych

Gdy zawiesina ma być transportowana na duże odległości, kwestia utrzymania stałości oporów jej przepływu w rurociągu ma znaczenie zasadnicze. Ponieważ opory przepływu (zwłaszcza przy wysokich zagęszczeniach) zależą bardzo silnie od parametrów reologicznych zawiesiny, przeto konieczne staje się utrzymanie stałości koncentracji objętościowej c_v popiołów lotnych w zawiesinie.



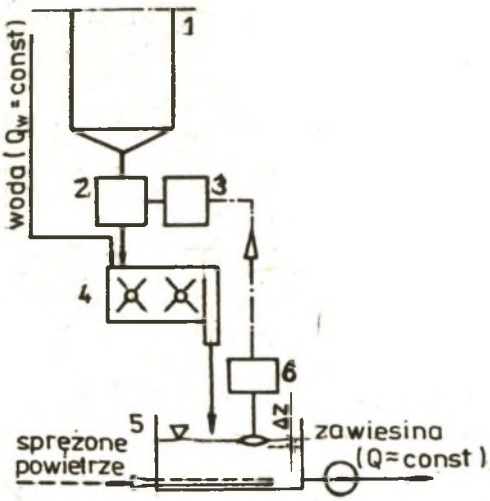
Rys.9. Schemat instalacji do wytwarzania w procesie ciągłym zawiesiny popiołów lotnych w wodzie o stałej koncentracji masowej popiołów lotnych (c_M = const)

Oryginalną instalację [13] umożliwiającą wytwarzanie zawiesiny (przy c_v = const) przedstawiono na rysunku 10. Zasobnik popiołów lotnych 1 połączony jest poprzez podajnik popiołów 2 wyposażony w regulator 3 natężenia strumienia popiołów, z mieszarką 4. Mieszarka 4 (do której doprowadzana jest woda) połączona jest poprzez przelew z zbiornikiem retencyjnym 5 zawiesiny. Zbiornik 5 wyposażony jest w miernik poziomu 6 zawiesiny, sprzężony z regulatorem 3 natężenia strumienia popiołów. Układ agitacji mieszaniny i jej odprowadzania ze zbiornika 5 jest analogiczny jak według rysunku 8.

Przedstawiona (w uproszczeniu) instalacja funkcjonuje następująco. Do mieszarki 4 doprowadzany jest strumień wody o stałym natężeniu objętościowym Q_w = const, którego wielkość ustala się stosownie do wymaganego zagęszczenia zawiesiny z relacji

$$Q_w = Q\,(1 - c_v), \tag{4}$$

przy czym Q jest wydajnością pompy. W stanie równowagi musi nastąpić objętościowe zbilansowanie się natężeń strumieni: wody - Q_w i popiołów lotnych



Rys. 10. Schemat instalacji do wytwarzania w procesie ciągłym zawiesiny popiołów lotnych w wodzie o stałej koncentracji objętościowej popiołów lotnych (c_v = const)

- Q_p z natężeniem strumienia zawiesiny - Q. Ponieważ Q_w = const i Q ≈ const (co ma miejsce w przypadku pompowania zawiesiny o stałej koncentracji objętościowej), przeto aby spełniony był bilans, objętościowe natężenie strumienia popiołów lotnych musi wynosić

$$Q_p = Q - Q_w \qquad (5)$$

a wtedy ilość zawiesiny w zbiorniku retencyjnym 5(traktowana objętościowo) nie ulega zmianie. Ewentualna zmiana objętościowego natężenia strumienia popiołów lotnych do wartości $Q_p' = Q_p + \Delta Q_p$, spowoduje po czasie Δt zmianę położenia poziomu zawiesiny w zbiorniku retencyjnym 5 o wielkość

$$\Delta z = \frac{\Delta Q_p}{A} \Delta t, \qquad (6)$$

gdzie: A - powierzchnia zbiornika, przy czym oczywiście ΔQ_p może przyjmować wartości dodatnie i ujemne.

Miernik poziomu zawiesiny 6 sprzężony z regulatorem 3 natężenia strumienia popiołów spowoduje zmianę natężenia strumienia popiołów tak, aby przywrócić stan równowagi układu odpowiadający stałemu poziomowi zawiesiny w zbiorniku retencyjnym 5.

Zaprezentowana instalacja jest bardzo prosta w budowie i funkcjonowaniu. W sytuacjach awaryjnych (nagłe zmniejszenie wydajności pompy) układ automatycznej regulacji zadziała w kierunku bezpiecznym, ograniczając strumień doprowadzanych popiołów lotnych. Ponieważ określanie poziomu położenia powierzchni zawiesiny w zbiorniku retencyjnym może być dokonane stosunkowo dokładnie, przeto układ zapewnia w praktyce stałość udziału objętościowego fazy stałej (popiołów lotnych) w wytwarzanej zawiesinie.

Instalację można wyposażyć w urządzenie doprowadzające strumień żużli do zbiornika retencyjnego. Gdy strumień doprowadzanych żużli miałby w przybliżeniu stałe natężenie, to odprowadzana mieszanina popiołowo-żużlowo-wodna odznaczałaby się praktycznie stałym składem objętościowym.

5. Transport rurociągowy gęstej zawiesiny

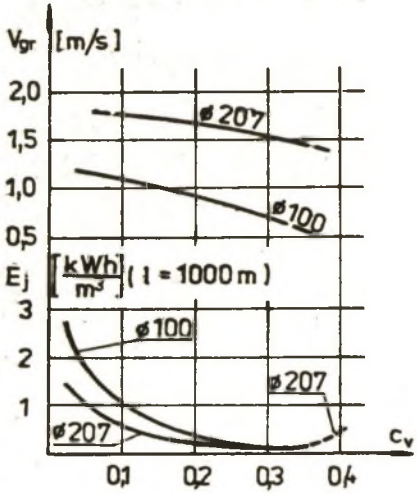
Parametry przepływu zawiesin popiołowo-wodnych są zależne przede wszyst-

kim od koncentracji objętościowej popiołów lotnych w zawiesinie.

Jak wykazały badania stanowiskowe [7], w zakresie $c_v < 0,35$ straty energetyczne zawiesin popiołowo-wodnych spełniają zależność Folsoma-O'Briena. Wynika stąd, że straty energii jednostkowej (odniesionej do jednostki masy cieczy) w przypadku wody i zawiesiny są takie same, czyli

$$\Delta y_{(w)} = \Delta y_{(m)} \tag{7}$$

Konieczne jest kontynuowanie badań przy wyższych wartościach koncentracji c_v.



Rys.11. Zależność prędkości granicznej - v_{gr} i wskaźnika zużycia energii - E_j na przemieszczenie 1 m^3 popiołów lotnych (ρ_p = 2140 kg/m^3) w rurociągu o długości 1000 m przy prędkości równej granicznej, w zależności od koncentracji objętościowej popiołów lotnych w zawiesinie

Na rysunku 11 przytoczono [7] zależność prędkości granicznej (rozumianej jako prędkość, przy której cząstki popiołów lotnych pozostają w stanie zawieszenia) - v_{gr}, od koncentracji objętościowej c_v. Znamienne jest monotoniczne zmniejszanie się v_{gr} ze wzrostem c_v. Na rysunku 11 zamieszczono również (obliczone na podstawie danych z [7]) wartości energii potrzebnej na przemieszczenie 1 m^3 popiołów lotnych w rurociągu o długości 1000 m, przy prędkości równej granicznej. Minimalne zapotrzebowanie energii występuje w zakresie c_v = = 0,30 - 0,35; następnie należy oczekiwać ponownie wzrostu zużycia energii. Minimalne wartości są praktycznie takie same w przypadku rurociągów o różnych średnicach (100 i 207 mm). Wprawdzie określenie wartości energii przy największych wartościach koncentracji objętościowych (linia przerywana na rys. 11) ma charakter przybliżony, jednakże widać, że zużycie energii na jednostkę objętości popiołów lotnych w przypadku "gęstej" zawiesiny jest zdecydowanie mniejsze w porównaniu z instalacjami tradycyjnymi, jakkolwiek różnice tych wartości zmieniają się w zależności od koncentracji objętościowej popiołów lotnych.

Wpływ koncentracji objętościowej popiołów lotnych na parametry pracy pomp krętnych odśrodkowych w zakresie $c_v < 0,35$ jest niewyczuwalny (użyteczna praca jednostkowa pompy oraz sprawność pompy nie ulegają zauważalnym zmianom, moc na wale pompy jest proporcjonalna do gęstości mieszaniny). W zakresie $0,35 < c_v < 0,48$ praca jednostkowa może zmaleć o około 10 %, zaś sprawność obniżyć się o kilka punktów.

Rozpatrując odprowadzanie żużli energetycznych w "gęstej zawiesinie" spełniającej rolę ciężkiej cieczy nośnej, należy brać pod uwagę, że ich wypad masowy stanowi zwykle około 15 % sumarycznego wypadu odpadów paleniskowych. Udział objętościowy żużli w mieszaninie (z "gęstą" zawiesiną) zawarty więc

będzie w granicach $c_v' = 0,04 - 0,08$ w zależności od konkretnych uwarunkowań. Jego dodatek nie spowoduje więc zasadniczych zmian parametrów pracy instalacji, zważywszy specyficzne warunki jego przenoszenia w ciężkiej cieczy nośnej oraz konieczność jego granulowania (wobec stosowania pomp o zmniejszonych wydajnościach, a więc także o mniejszych przekrojach przepływowych).

Transport rurociągowy zawiesiny popiołów lotnych w wodzie o koncentracji objętościowej popiołów lotnych około $c_v \approx 0,44 - 0,46$ (a okresowo i wyższej) został pomyślnie zweryfikowany w praktyce. Nie nastręcza on szczególniejszych trudności eksploatacyjnych, nawet w ostrych warunkach zimowych.

6. Składowanie odpadów paleniskowych

W przypadku wprowadzenia na składowisko zawiesiny wytworzonej z suchych popiołów lotnych i wody - o ograniczonej ilości wody (stosunek wagowy popiołów lotnych do wody powyżej 1:1), woda nie jest praktycznie odprowadzana poza składowisko. Wówczas substancje aktywne w procesach wiązania (a przede wszystkim CaO wolne) nie zostają odprowadzane poza składowisko wraz z wodą traconą w różny sposób. Natomiast naturalne odparowywanie wody nie powoduje ubytków substancji wiążących. Następuje więc zestalenie się zawiesiny w masę stałą. Zawartość żużli i innych stałych odpadów w zestalonej zawiesinie nie pogarsza w wyraźny sposób współczynnika przepuszczalności.

Składowanie odpadów paleniskowych w postaci zestalonej masy przynosi różnorakie korzyści. W pierwszej fazie wypełniania składowiska zawiesina wnika i wypełnia wszelkie szczeliny i spękania gruntu lub górotworu stanowiącego podłoże składowiska. Po zestaleniu się zawiesiny w masę stałą uszczelnia ona podłoże w stosunku do ponownie wprowadzanych warstw płynnych. Nie ma więc potrzeby izolowania podłoża ani też drenowania składowiska (z wyjątkiem szczególnych sytuacji, gdy podczas budowy składowiska zostaną naruszone warunki przepływu wód powierzchniowych lub gruntowych). Zbędna jest także instalacja wody powrotnej. Możliwe staje się więc efektywne składowanie odpadów paleniskowych zarówno podpoziomowo (w różnego rodzaju zapadliskach i wyrobiskach) jak i nadpoziomowo. Niewielkie przyrosty dobowe wprowadzanych warstw płynnych wywierają znikome napory na obwałowania boczne składowisk nadpoziomowych. Składowanie według opisanej metody eliminuje bądź radykalnie ogranicza pylenie składowisk. Wreszcie wypełnione składowisko może być oddane do zagospodarowania lub rekultywacji bez potrzeby jakichkolwiek zabiegów w celu utwardzania lub stabilizacji jego powierzchni.

Badania [4] wykazały, że w stosunku do tradycyjnego składowania popiołów lotnych nowa metoda ogranicza kilkakrotnie ogólny ładunek zanieczyszczeń przekazywanych do otoczenia. Jest więc ona bezpieczna dla środowiska naturalnego.

7. Uwagi końcowe

Analiza wpływu koncentracji objętościowej popiołów w zawiesinie na jej parametry oraz na wielkość zużycia energii na transport rurowy zawiesiny, a także analiza wpływu koncentracji na właściwości zestalonej masy wykazują, że efekty tych wpływów są zróżnicowane. Ze wzrostem koncentracji objętościo-

wej wzrasta wytrzymałość i maleje wodoprzepuszczalność zestalonej masy, z tego więc względu nie ma ograniczeń w stosunku do górnej granicy koncentracji objętościowej popiołów w zawiesinie.
Jednak nadmierny wzrost koncentracji objętościowej popiołów w zawiesinie pogarsza warunki transportu rurowego zawiesiny. Raptowny wzrost lepkości dynamicznej i naprężenia stycznego początkowego powyżej wartości c_v = 0,34-0,36 powoduje wzrost oporów przepływu, a w następstwie zużycia energii.

Konieczny jest w tym przypadku kompromis między korzystnym wpływem koncentracji objętościowej popiołów na właściwości tworzonej na składowisku masy zestalonej, a zwiększaniem się oporów przepływu w zakresie najwyższych wartości koncentracji objętościowych.

Jak wykazano, transport i składowanie odpadów paleniskowych w postaci gęstej zawiesiny popiołów lotnych (z ewentualnym dodatkiem żużli) w wodzie ma szereg zalet i przynosi bezsporne korzyści w porównaniu z sposobami i instalacjami dotychczas powszechnie stosowanymi. Osiąga się efekty bezpośrednio wymierne związane ze zmniejszeniem zużycia energii i wody, ograniczeniem nakładów inwestycyjnych, zwłaszcza w rejonie składowiska, wreszcie ze zmniejszeniem kosztów eksploatacji i zagospodarowywania składowiska.
Niemniej ważne, a może nawet ważniejsze są jednak efekty niewymierne, związane z radykalnym ograniczeniem emisji różnego rodzaju zanieczyszczeń do wód, gleby i powietrza. Istnieją również możliwości korzystnego skojarzenia omawianego sposobu transportu i składowania odpadów paleniskowych z transportem i składowaniem produktów procesu odsiarczania spalin metodą "mokrą" wapienną [12].

Przedstawiona nowa technologia transportu i składowania odpadów paleniskowych pozwala więc na osiągnięcie znacznego postępu w odniesieniu do sposobów aktualnie stosowanych. Wywołała ona duże zainteresowanie wśród energetyków w kraju i za granicą.
Można więc sądzić, że transport i składowanie odpadów paleniskowych w postaci gęstej zawiesiny w wodzie znajdzie szersze zastosowanie w energetyce krajowej i zagranicznej już w nieodległych latach.

Literatura

[1] Altay L., Miklos A., Vitaris G.: Sammlung und Transport der Flugasche im Kraftwerk Nováky, Zweites Kolloquium über Hydromechanisation, E3, Rostock 1981.

[2] Hupka F., Hrbek J., Janalik J.: Hydraulicka doprawa w potrubi, SNTL, Praha 1970.

[3] Łączny M.J. i inni: Laboratoryjne badania wpływu niskowodnej metody składowania popiołów lotnych z węgli kamiennych na glebę, wody podziemne i powietrze w rejonie składowiska, Instytut Kształtowania Środowiska, Oddział w Katowicach, sprawozdanie nr 0-741, 1982 (niepublikowane).

[4] Rokita J.: Właściwości erozyjne mieszanin odpadów paleniskowych z wodą, V seminarium - Transport i Sedymentacja Cząstek Stałych, Wrocław 1984.

[5] Rokita J.: Erosional influence of mixtures of fine-graned solids in liquids on impeller pumps, Seventh International Conference on Erosion by

Liquid and Solid Impact, Cambridge 1987.
[6] Rokita J., Tomaszewski Sł.: Transport i składowanie elektrownianych odpadów paleniskowych w postaci zawiesiny wodnej o dużej koncentracji fazy stałej, Energetyka nr 11, 1985.
[7] Sprawozdanie z pracy naukowo-badawczej: Badania spadków ciśnień i prędkości granicznych przy przepływie mieszaniny popiołowo-wodnej..., Instytut Budownictwa Wodnego i Ziemnego AR we Wrocławiu, 1983 (niepublikowane)
[8] Opis patentowy PRL nr 65763 "Sposób hydraulicznego transportu żużla i popiołu oraz urządzenie do stosowania tego sposobu (Z.Kirakowski).
[9] Opis patentowy PRL nr 128713 "Sposób i układ urządzeń do odprowadzania i transportu żużli energetycznych i innych odpadów stałych z elektrowni, elektrociepłowni i ciepłowni" (Kmiecik J., Rokita J., Szubra J., Tomaszewski Sł., Wilgusiewicz W., Zarzycki M.).
[10] Opis patentowy PRL nr 134265 "Sposób sporządzania zawiesiny popiołów lotnych w wodzie oraz układ urządzeń do wytwarzania i transportu rurowego tej zawiesiny" (Kmiecik J., Rokita J., Tomaszewski Sł., Wilgusiewicz W. i inni).
[11] Opis patentowy PRL nr 134274 "Sposób wypełniania z uszczelnieniem powierzchniowych składowisk odpadami z elektrowni, elektrociepłowni i ciepłowni" (Kmiecik J., Rokita J., Szubra J., Tomaszewski Sł., Wilgusiewicz W.).
[12] Opis patentowy nr 134943 "Środek do uszczelniania podłoża gruntowego", (Rokita J., Janusz St., i inni).
[13] Zgłoszenie projektu wynalazczego w UP PRL nr P-252075 "Sposób odprowadzania popiołów lotnych do miejsca przeznaczenia oraz układ urządzeń do odprowadzania popiołów lotnych do miejsca przeznaczenia", (Rokita J., Tomaszewski Sł., Zarzycki M., Szymoniak Z., Skrzypek L., Kmiecik J.).
[14] Zgłoszenie projektu wynalazczego w UP PRL nr P-263566 "Układ do wytwarzania gęstej mieszaniny odpadów paleniskowych z wodą, a zwłaszcza popiołów lotnych i żużli energetycznych z wodą" (Rokita J., Kmiecik J., Wilgusiewicz W., Zarzycki M., Szymoniak Z., Skrzypek L., Tomaszewski Sł.).

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Adam KLICH

Wpłynęło do Redakcji 1987.05.21

КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОТВОДА И СКЛАДИРОВАНИЯ ЛЕТУЧЕЙ ЗОЛЫ И ШЛАКА В ВИДЕ ГУСТОЙ ВЗВЕСИ В ВОДЕ

Р е з ю м е

В работе представлена новая технология отвода и складирования летучих зол и шлаков в виде густой взвеси в воде. Количество твёрдой фазы в смеси характеризуется в размере 1-2,5 кг твёрдой фазы/1 кг воды. Такая смесь может без помех транспортироваться в трубопроводах, тогда как на складской территории проявляет склонность к затвердеванию с сопротивляемостью сжатию (обычно высшей чем 50 кПа) и очень малой водопроницаемостью (коэффициент проницаемости ниже 1.10^{-6} м(с). В таком виде складированные отходы не вредят окружающей среде. Представлены свойства и параметры густых взвесей золы с водой. Указано, что такие взвеси должны производиться по программному процессу с соответствующим оборудованием.

Представлено такое оборудованием, обращая внимание на очень простое по конструкции и действию оборудование, которое даёт возможность производить взвеси с постоянным объёмным соотношением твёрдой фазы (рис. 10).

Обсуждена проблема транспортировки густых взвесей трубопроводами. Указано на перспективное использование этой технологии в энергетике.

COMPLEX TECHNOLOGY OF CARRYING OFF AND STORING THE FLY-ASH AND SLAG IN THE FORM OF DENSE SUSPENSION IN WATER

S u m m a r y

The paper presents new technology of carrying off and storing the gly-ash and slag in the form of dense suspension with water. Participation of solid phase in the mixture is characterized by mass ratio in the range (1-2,5) kg of solid phase/1 kg of water. Such a mixture can be easily transported in pipelines, however, on the open storage yard it seems to be able to solidify into a solid body with a certain compressive strength (usually bigger than 50 kPa) and minimal water permeability (permeability coefficient below 1.10^{-6} m/s). Furnace waste materials stored in such form do not threaten the natural environment. Features and parameters of dense ash-water suspensions have been presented. It has been shown that such suspensions must be made in a programmed process in proper systems. Also some systems have been presented, paying attention to a very simple in structure and performance system which enables making the suspension with constant volume fraction of a solid phase (fig. 10).

Some chosen problems of piping of dense mixtures has been discussed. Some perspectives of applying the technology in power industry have been pointed out.