

Jerzy ROKITA

Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych
Politechnika Śląska

WŁASNOŚCI REOLOGICZNE GĘSTYCH ZAWIESIN POPIOŁÓW LOTNYCH W WODZIE

Streszczenie: Przedstawiono własności reologiczne zawiesin suchych popiołów lotnych w wodzie. Stwierdzono, że przy wzrastających koncentracjach objętościowych fazy stałej wykazują one właściwości cieczy nienewtonowskich (gdy $c_v \gg 0,15 - 0,20$). Własności reologiczne zawiesin można przedstawić najczęściej modelem Bingham'a. Sformułowano wnioski o znaczeniu praktycznym.

1. Wprowadzenie

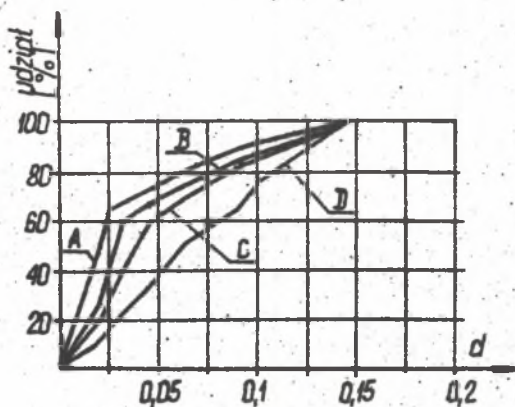
Nowa technologia odprowadzania [10] i składowania [9] elektrownianych odpadów paleniskowych polega na stosowaniu specjalnie w tym celu wytwarzanych zawiesin popiołów lotnych w wodzie [8]. Zawiesiny te odznaczają się wysokimi koncentracjami objętościowymi fazy stałej (popiołów). Ponieważ są one odprowadzane na składowiska poprzez rurociągi, dlatego istotna jest kwestia prognozowania ich oporów przepływu. Pewnych informacji umożliwiających taką prognozę, dostarczają wyniki badań własności reologicznych zawiesin popiołów lotnych w wodzie.

2. Skład chemiczny i granulometryczny popiołów lotnych

Pod względem składu chemicznego suche popioły lotne stanowią mieszaninę związków: krzemu (Si), glinu (Al), żelaza (Fe), wapnia (Ca), magnezu (Mg), siarki (S). Krzem - będący głównym składnikiem popiołów z węgla kamiennego występuje zarówno w postaci krzemionki (SiO_2), jak i różnych glinokrzemianów. Związki te są odpowiedzialne za erozyjne właściwości popiołów lotnych. Tlenki wapnia i magnezu (CaO i MgO) wykazują właściwości wiążące i powodują zestalanie się zawiesin popiołowo-wodnych po pewnym czasie.

Gęstość suchych popiołów lotnych zmienia się w dość szerokich granicach (1,4 do 2,5 g/cm^3). Tak znaczne różnice gęstości popiołów lotnych są powodowane zróżnicowaniem rozwinięcia powierzchni ich ziaren. Ziarna popiołów mogą być kuliste o słabo rozwiniętej powierzchni lub też ich powierzchnie może tworzyć bardzo liczne mikropory wypełniane powietrzem, które powodu-

ją zmniejszenie średniej gęstości wyznaczonej metodą piknometryczną. W trakcie pomiaru te mikropory nie zostają bowiem wypełnione cieczą. Skład granulometryczny suchych popiołów lotnych jest zróżnicowany. Generalnie stanowią one mieszaniny drobnoziarniste polifrakcyjne, zwykle z przewagą frakcji najdrobniejszych -



Rys. 1. Krzywe granulometryczne popiołów lotnych z węgla kamiennych, z różnych elektrowni

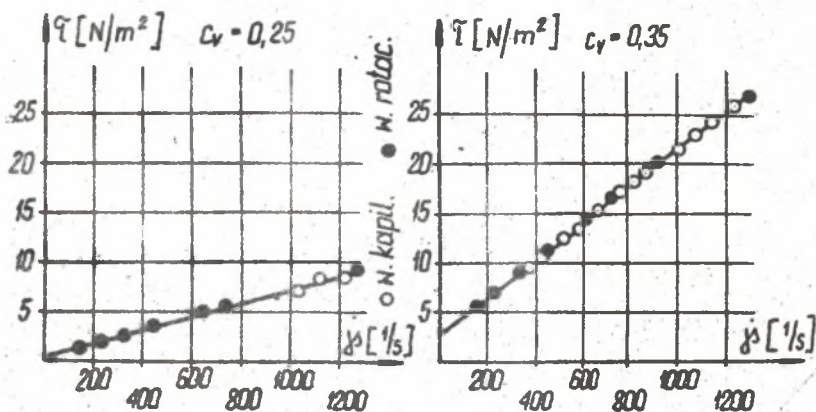
Na rysunku 1 przedstawiono składy granulometryczne suchych popiołów lotnych pochodzących z węgla kamiennych spalanych w różnych elektrowniach zawodowych. Jak widać, ich składy granulometryczne różnią się znacznie.

3. Badania własności reologicznych zawiesin

Badania własności reologicznych zawiesin suchych popiołów lotnych w wodzie prowadzono wykorzystując reometr kapilarny [3] oraz reometr rotacyjny (typu Reotest 2). Ten ostatni został wyposażony w dodatkowy układ obiegu zawiesiny w szczelinie, eliminujący wpływ zjawiska sedymentacji fazy stałej w szczelinie pomiarowej, zaproponowany przez autora pracy [1].

Reometr kapilarny (z kapilarą o średnicy 1,485 mm) umożliwił w praktyce prowadzenie pomiarów przy koncentracjach objętościowych fazy stałej w mieszaninie nie wyższych niż około $c_v \approx 0,33 - 0,36$ (w zależności od badanego popiołu), ze względu na zatykanie się kapilary przy koncentracjach wyższych.

W przypadku użycia reometru rotacyjnego przy analizie pomiarów zwracano uwagę, że istnieje pewna minimalna prędkość kątowa cylindra ω_{\min} , przy której następuje pełne upłynnienie zawiesiny w lepkościomierzu [4], jak też istnieje pewna maksymalna prędkość kątowa cylindra ω_{\max} pozwalająca wykluczyć istnienie zakłócenia przepływu laminarnego w szczelinie lepkościomierza [2]. Badania przeprowadzone przy wykorzystaniu obu przyrządów wykazały, że w porównywalnych zakresach uzyskane wyniki dobrze korespondują ze sobą.



Kys. 2. Krzywe płynięcia wyznaczone wiskozymetrem kapilarnym i wiskozymetrem rotacyjnym.

Na rysunku 2 przedstawiono krzywe płynięcia (zależności między naprężeniem stycznym τ a szybkością ścinania $\dot{\gamma}$) otrzymane dla tych samych zawiesin (ten sam popiół, taka sama koncentracja objętościowa) w obu przypadkach pomiarowych. Krzywe płynięcia wyznaczano dla zawiesin o koncentracjach objętościowych fazy stałej w granicach $c_v = 0 - 0,45$, sporządzonych z popiołów lotnych pochodzących z kilku różnych elektrowni.

4. Wyniki badań

Pomiary krzywych płynięcia wykazały, że własności reologiczne zawiesin popiołów lotnych w wodzie są zróżnicowane.

Na rysunku 3 przedstawione zostały dla przykładu krzywe płynięcia dla zawiesin preparowanych z popiołów A i D, różniących się wyraźnie zawartością najdrobniejszych frakcji.

Analiza wyników pomiarów pozwoliła na poczynienie następujących spostrzeżeń. W zakresie małych koncentracji objętościowych ($c_v < 0,15 - 0,20$) zawiesiny popiołów lotnych z wodą zachowują się jak ciecze newtonowskie, a więc ich krzywe płynięcia w tym zakresie koncentracji spełniają równanie Newtona

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

w którym:

η - lepkość dynamiczna.

Lepkość dynamiczna zawiesiny zwiększa się w miarę wzrostu koncentracji objętościowej popiołu.

Koncentrację objętościową $c_v \approx 0,15 - 0,18$ można uważać za koncentrację graniczną, powyżej której w zawieszynie ujawniają się cechy cieczy nielawtonowskiej.

Po przekroczeniu koncentracji granicznej zawiesziny wykazują zwykle cechy

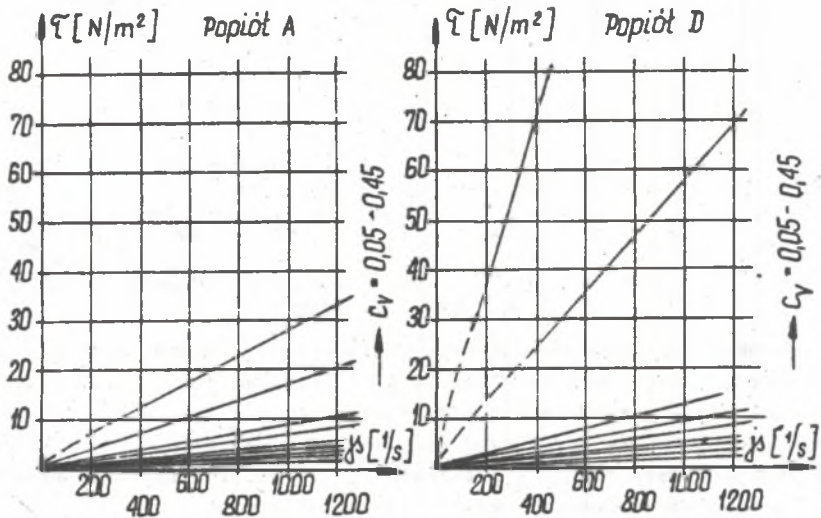
ciała plastyczno-lepkiego i z dostateczną dokładnością mogą być opisane modelem Bingham'a [7]

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad (2)$$

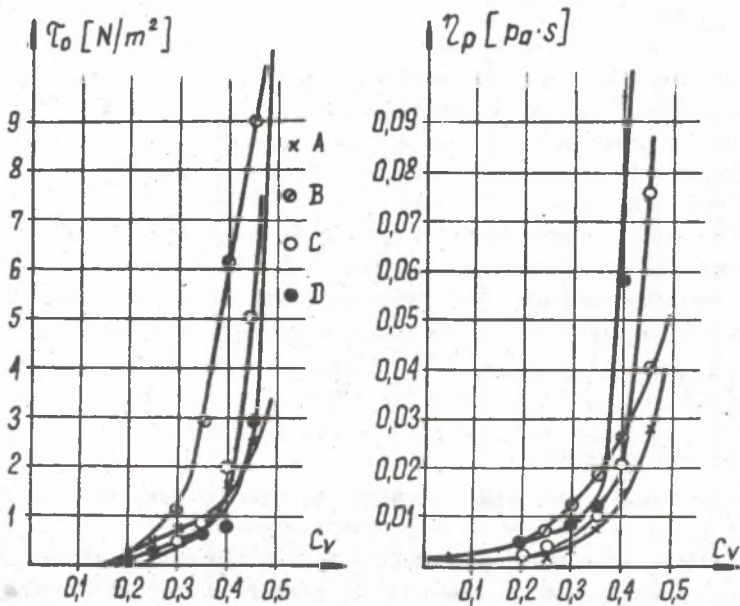
gdzie:

τ_0 - naprężenie początkowe,

η_p - lepkość plastyczna.



Rys. 3. Krzywe płynięcia zawieszin z wybranymi popiołami



Rys. 4. Zależność τ_0 i η_p od koncentracji objętościowej popiołu w zawieszynie

Zarówno τ_0 jak i η_p wzrastają w miarę zwiększania się koncentracji objętościowej popiołów w zawieszinie. Na rysunku 4 przedstawiono ilościowy wpływ koncentracji objętościowej popiołów w zawieszinie na τ_0 i η_p (przy czym w zakresie małych koncentracji η_p należy rozumieć jako lepkość cieczy newtonowskiej). Charakter zmian τ_0 i η_p jest wprawdzie podobny, jednakże różnice wartości są znaczne. Większe wartości η_p występują w przypadku zawiesin zawierających mniejsze udziały najdrobniejszych frakcji ziarnowych.

Należy zwrócić uwagę, że przy najwyższych uwzględnianych w badaniach zawiesin koncentracjach objętościowych $c_v \approx 0,40 - 0,45$ zawieszina nabiera cech ciała pseudoplastycznego i może być korzystnie opisana modelem Ostwalda-de Waele'a [7]

$$\tau = k \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

gdzie:

k, n - parametry reologiczne (miara lepkości pozornej i miara odchylenia od własności cieczy newtonowskiej).

Świadczyłyby to o wzroście zdolności do uporządkowania struktury zawiesiny w przypadku wysokich koncentracji fazy stałej.

Ponieważ ze względu na olbrzymi wzrost lepkości przy najwyższych koncentracjach ($c_v > 0,4$), nie jest realne przetłaczanie tak znacznie zagęszczonych zawiesin przez rurociągi, przeto w interesującym ze względów praktycznych zakresie koncentracji $c_v \approx 0,25 - 0,40$ można z powodzeniem traktować zawiesiny popiołowo-wodne jako ciało Bingham'a.

5. Prognozowanie oporów przepływu zawiesin w rurociągach

Przepływ zawiesin popiołów lotnych w wodzie w rurociągach może mieć charakter laminarny (gdy $Re^* < 2200 - 2400$) lub turbulentny, przeważnie zresztą w strefie przejściowej (gdy $2200 - 2400 < Re^* < 20000$).

Dla cieczy opisanej modelem Bingham'a uogólnioną liczbę Reynoldsa Re^* określa się z wzoru [5,6]

$$Re^* = \frac{\rho v d}{\eta_p + \frac{\tau_0 d}{8v}} \quad (4)$$

w którym:

- ρ - gęstość zawiesiny,
- v - prędkość przepływu zawiesiny,
- d - średnica rurociągu.

W strefie ruchu laminarnego współczynnik oporu liniowego λ rurociągu można określić z dużą dokładnością z równania [5,6]

$$\lambda = 64 (Re^*)^{-1} \quad (5)$$

W strefie przejściowej wartości λ uzyskane z równania Blasiusa [5,6]

$$\lambda = 0,316 (Re^*)^{-0,25} \quad (6)$$

są zwykle od kilku do kilkunastu procent wyższe od wartości rzeczywistych. Stwarza to możliwość bezpiecznego określania oporów przepływu zawiesiny.

Poza strefą przejściową określanie współczynnika λ dla przepływu turbulentnego powinno być dokonywane na podstawie badań stanowiskowych. Jednakże przepływ wysoko skoncentrowanych zawiesin poza strefą przejściową zdarza się w rzeczywistości rzadko.

Trzeba też zasygnalizować, że w miarę upływu czasu (rzędu 1-2 godzin) stają się zauważalne zmiany własności reologicznych zawiesin popiołowo-wodnych (w kierunku wzrostu lepkości plastycznej i naprężenia początkowego) w wyniku występujących procesów chemicznych. Należy zmiany te uwzględnić zwłaszcza w przypadku dalekosiędnego transportu rurowego zawiesin.

LITERATURA

- [1] Błaszczyk J.: Badania lepkości paliw olejowo-węglowych, praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1981.
- [2] Kembłowski: Reometria płynów nienewtonowskich, WNT, 1973.
- [3] Nowak I., Dzieża J.: Metody pomiaru własności reologicznych cieczy zawiesinowych, Archiwum Górnictwa, tom XXIII, nr 4, 1978.
- [4] Parzonka W.: Teoria wiskozymetrów do jednorodnych mieszanin gruntowo-wodnych, Rozprawy Inżynierskie nr 1, 1968.
- [5] Parzonka W.: Hydrauliczne podstawy transportu rurowego mieszanin dwufazowych, skrypt Akademii Rolniczej, Wrocław 1977.
- [6] Rabinowicz E.Z.: Gidrawlika, Izd. Niedra, Moskwa 1980.
- [7] Wilkinson W.: Płyny nienewtonowskie, WNT, 1963.
- [8] Zgłoszenie patentowe PRL nr P-218778.
- [9] Zgłoszenie Patentowe PRL nr P-221769.
- [10] Patent PRL nr 128713.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГУСТЫХ ВЗВЕСЕЙ СОЛИ-УНОСА В ВОДЕ

Резюме

Приводятся реологические свойства густых суспензий сухой соли-уноса в воде. Было констатировано, что при возрастающих объемных концентрациях твердой фазы эти взвеси проявляют свойства не-newтоновских жидкостей, когда удельная теплоёмкость при постоянном объеме c_v 0,15 - 0,20. Реологические свойства взвесей можно чаще всего выразить при помощи модели Бингхама. Формулируются выводы имеющие практическое значение.

**RHEOLOGICAL PROPERTIES OF DENSE SUSPENSIONS
OF FLY ASH IN WATER**

S u m m a r y

The paper deals with the rheological properties of the suspensions of dry fly ashes in water. It has been found that at larger volumetric concentrations of a solid phase they display the properties of a Newtonian fluid (when $C_v = 0.15 - 0.20$). The rheological properties of suspensions are most often represented in the form of a Bingham model. Conclusions of practical consequence have been formulated.