POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

83-84

WARSZAWA – POZNAŃ 1983
PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

RADA REDAKCYJNA—EDITORIAL BOARD

TADEUSZ GERLACH · HENRYK JARZYNA · JERZY KRZYŻANOWSKI
STEFAN PERYCZ · WŁODZIMIERZ PROSNAK · KAZIMIERZ STELLER
ROBERT SZEWALSKI (PRZEWODNICZĄCY - CHAIRMAN) · JÓZEF ŚMIGIELSKI

KOMITET REDAKCYJNY—EXECUTIVE EDITORS

KAZIMIERZ STELLER – REDAKTOR – EDITOR
WOJCIECH PIETRASZKIEWICZ · ZENON ZAKRZEWSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA—EDITORIAL OFFICE

Instytut Maszyn Przepływowych PAN
ul. Gen. Józefa Fiszera 14, 80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1983

Printed in Poland

ISBN 83-01-04553-1
ISBN 0079-3205

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE – ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład 340+90 egz.	Oddano do składania 17 VI 1982 r.
Ark. wyd. 21,5. Ark. druk. 16,75+1 wkl.	Podpisano do druku 22 IV 1983 r.
Pap. druk. sat. kl. V, 70 g	Druk ukończono w maju 1983 r.
Nr zam. 489/184.	E-9/215. Cena zł 200,–

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

HYDROFORUM

KONFERENCJA NAUKOWO-TECHNICZNA

na temat

PROBLEMY ROZWOJU HYDRAULICZNYCH MASZYN WIROWYCH ZE SZCZEGÓLNYM UWZGLĘDNIENIEM POTRZEB ENERGETYKI

Porąbka-Kozubnik, 20 - 23, września 1980 r.

*

HYDROFORUM

SCIENTIFIC-TECHNICAL CONFERENCE

on

DEVELOPMENT PROBLEMS OF HYDRAULIC TURBOMACHINES WITH SPECIAL ACCOUNT OF THE NEEDS OF POWER ENGINEERING

Porąbka-Kozubnik, September 20 - 23, 1980

*

ГИДРОФОРУМ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

на тему

ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ РОТОРНЫХ МАШИН С ОСОБЫМ УЧЕТОМ НУЖД ЭНЕРГЕТИКИ

Поромбка-Козубник, 20 - 23 сентября 1980 г.

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH
1983 Zeszyt 83 - 84

JERZY ROKITA

Gliwice*

Wpływ koncentracji objętościowej popiołów lotnych w wodzie na parametry pracy pompy o swobodnym przepływie

Sformułowano pojęcie sprawności pompy netto w odniesieniu do przepompowywanej fazy stałej. Omówiono własności fizyczne suchych popiołów lotnych oraz mieszanin popiołowo-wodnych. Stwierdzono, że w przypadku pompowania mieszanin popiołowo-wodnych wzrasta wyraźnie sprawność pompy. Przeanalizowano wpływ koncentracji objętościowej popiołów na wartość wysokości strat hydraulicznych w pompie.

1. Efektywność działania pompy w układzie hydraulicznego transportu drobnoziarnistych ciał stałych

Hydrauliczny transport drobnoziarnistych ciał stałych w cieczach jest szeroko stosowany w technice. Z reguły wówczas efektem użytkowym działania instalacji jest przenoszenie fazy stałej, a więc w odniesieniu do fazy stałej należy rozpatrywać efektywność działania instalacji. Rozpatrując działanie pompy w instalacji hydraulicznego transportu ciał stałych, można mówić o sprawności pompy „netto", odniesionej do pompowanej fazy stałej.

Sprawność pompy η_{pm} (odniesioną do pompowanej mieszaniny) można zdefiniować

$$\eta_{pm}=\frac{g\rho_m Q_m H_m}{N_m}, \tag{1}$$

gdzie Q – wydajność objętościowa pompy, H – użyteczna wysokość podnoszenia pompy, N – moc na wale pompy, ρ – gęstość, g – przyspieszenie siły ciężkości. Indeks m – oznacza mieszaninę.

Gęstość mieszaniny wyraża równanie:

$$\rho_m=\rho_s c_v+\rho_c(1-c_v), \tag{2}$$

w którym indeks s – oznacza fazę stałą, c – ciecz.

* Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej.

Sprawność pompy netto η_{ps} (odniesioną do fazy stałej) określa wzór definicyjny

$$\eta_{ps}=\frac{g\rho_s Q_s H_m}{N_m}. \tag{3}$$

Uwzględniając (1), (2), (3) otrzymuje się zależność

$$\eta_{ps}=\eta_{pm}\frac{1}{1+\frac{\rho_c}{\rho_s}\left(\frac{1}{c_v}-1\right)}. \tag{4}$$

W warunkach odniesienia sprawność pompy wyznacza się stosując czystą wodę jako czynnik roboczy. Wówczas sprawność pompy w trakcie pompowania wody η_{pc} i mieszaniny η_{pm} wiąże zależność

$$\eta_{pm}=k_{\eta m}\eta_{pc}. \tag{5}$$

Wtedy

$$\eta_{ps}=\eta_{pc}k_{\eta m}\frac{1}{1+\frac{\rho_c}{\rho_s}\left(\frac{1}{c_v}-1\right)}. \tag{6}$$

W zależności (6) pierwszy czynnik zależy od rodzaju i rozwiązania konstrukcyjnego pompy, drugi – od rodzaju pompy oraz własności fizycznych pompowanej mieszaniny; czynnik ułamkowy zaś zależy wyłącznie od określonych własności mieszaniny – przyjmie on taką samą wartość w przypadku każdej zastosowanej pompy.

Efektywność działania pompy w instalacji hydrotransportu jest tym większa, im większa jest sprawność pompy odniesiona do pompowanej fazy stałej.

2. Transport hydrauliczny popiołów lotnych i własności fizyczne mieszaniny popiołowo-wodnej

Transport hydrauliczny popiołów lotnych z elektrowni, elektrociepłowni i ciepłowni może być stosunkowo tanim i energooszczędnym sposobem ich odstawy i transportowania. Ze względu na ogromne masy popiołów (zwłaszcza w elektrowniach cieplnych) problem ich transportu ma poważne znaczenie w skali gospodarczej. Uzasadnia to w pełni celowość badań w tym zakresie.

Pod względem składu chemicznego suche popioły lotne stanowią mieszaninę: krzemionki (SiO_2), korundu (Al_2O_3), wapna palonego (CaO), magnetytu (Fe_3O_4) i hematytu (Fe_2O_3), bezwodnika kwasu siarkowego (SO_3) i innych związków chemicznych. Stąd gęstość suchych popiołów lotnych może zmieniać się w bardzo znacznych granicach (1,5 do 2,5 g/cm^3).

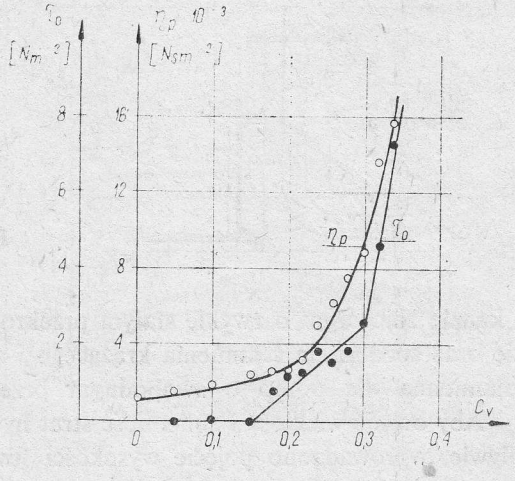
Ze względu na skład granulometryczny suche popioły lotne stanowią mieszaninę drobnoziarnistą, dla której średnica zastępcza ziarna wynosi zwykle 0,030 do 0,060 mm. Zawartość ziaren o średnicy powyżej 0,150 mm nie przewyższa zwykle 10% w stosunku wagowym. Mieszaninę suchych popiołów lotnych w wodzie można więc w sensie fizykochemicznym traktować jako układ drobnodyspersyjny.

Badania nad pompowaniem mieszaniny popiołów lotnych w wodzie, przeprowadzone zostały przy wykorzystaniu popiołów o następującym składzie granulometrycznym:

średnica ziaren (mm)	% zawartości (wagowo)
do 0,05	55,5
0,05 do 0,10	23,0
0,10 do 0,15	13,0
0,15 do 0,25	6,3
0,25 do 0,50	0,2

Średnia gęstość użytych w badaniach popiołów wynosiła $\rho = 2{,}38$ g/cm^3.

Badania własności reologicznych mieszanin popiołowo-wodnych, przeprowadzone na wiskozymetrze kapilarnym wykazały, że zależą one od koncentracji objętościowej. W zakresie $c_v < 0{,}15$ mieszanina wykazuje właściwości cieczy newtonowskiej, o wzrasta-



Rys. 1. Zależność stałych w równaniu (7) od koncentracji objętościowej popiołu w mieszaninie

jącej lepkości w miarę wzrostu c_v. Natomiast w przypadku $c_v > 0{,}15$ mieszanina przybiera cechy ciała plastyczno-lepkiego (model Binghama), przy czym lepkość plastyczna η_p silnie wzrasta w miarę wzrostu koncentracji fazy stałej. Związek między naprężeniem stycznym τ i szybkością odkształcenia postaciowego $\dot{\gamma}$ można zanotować w postaci

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma}, \tag{7}$$

gdzie τ_0 — naprężenie styczne początkowe (graniczne).

Zależności $\tau_0 = f(c_v)$ oraz $\eta_p = f(c_v)$ przedstawiono na rysunku 1. Prowadzenie pomiarów dla $c_v > 0{,}34$ okazało się niemożliwe, ze względu na zatykanie się reometru kapilarnego. Można jednak wnioskować, że dla $c_v > 0{,}34$ następuje bardzo silny wzrost η_p jak również i τ_0. Szczegółowe rezultaty badań własności fizycznych mieszanin popiołowo-wodnych przedstawiono w odrębnym opracowaniu [5].

3. Bilans mocy pompy o swobodnym przepływie

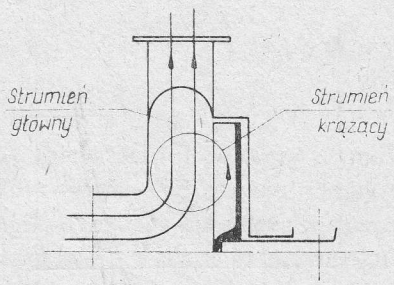
Pompa o swobodnym przepływie działa w wyniku sprzężenia hydrodynamicznego strumienia krążącego cieczy (wywołanego przepływem cieczy przez wirnik) oraz strumienia głównego. Potwierdzają to wyniki licznych badań [3, 4, 7]. Schemat działania pompy o swobodnym przepływie przedstawiono na rysunku 2.

Bilans mocy pompy o swobodnym przepływie można sformułować następująco:

$$N = g\rho QH + N_h + N_f + N_m, \tag{8}$$

gdzie N – moc na wale pompy, N_h – straty mocy wynikające z procesów hydrodynamicznych w pompie, N_f – straty mocy na tarcie tylnej powierzchni wirnika o ciecz, N_m – straty mocy na tarcie mechaniczne (dławnica, łożyska).

Straty mocy N_h można wyznaczyć na drodze pomiarowej. Obejmują one wszelkie straty związane z procesem przepływu cieczy przez wnętrze pompy. Z pewnym uproszczeniem można założyć, że dzielą się one na dwie zasadnicze części: straty przepływowe w króćcach



Rys. 2. Zasada działania pompy o swobodnym przepływie

i kanale zbiorczym o zwykle stałym przekroju i straty krążenia związane z mieszaniem się oraz rozdziałem strumienia krążącego i strumienia głównego (ta ostatnia strata jest znamienna dla pomp o swobodnym przepływie).

Aby ocenić wielkość i zmienność strat hydraulicznych w pompie o swobodnym przepływie, wprowadzono pojęcie wysokości strat hydraulicznych ΔH_h określonej wzorem

$$\Delta H_h = \frac{N_h}{g\rho Q} \tag{9}$$

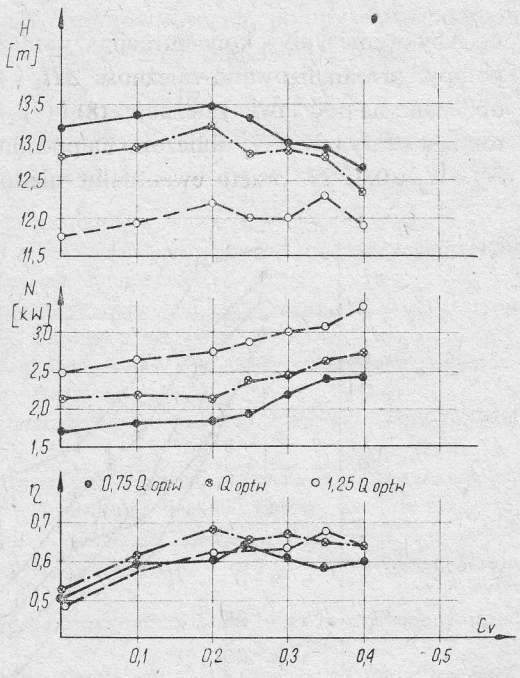
(która stanowi energię wynikającą z istnienia strat hydraulicznych odniesioną do jednostki ciężaru pompowanej cieczy lub mieszaniny).

Wprowadzenie pojęcia wysokości strat ΔH_h pompy o swobodnym przepływie stwarza możliwość analizy jej działania w różnych warunkach.

4. Pompowanie mieszaniny popiołowo-wodnej przy wykorzystaniu pompy o swobodnym przepływie

Wychodząc z założenia o celowości stosowania pomp o swobodnym przepływie, przeprowadzono badania nad wykorzystaniem tych pomp do pompowania mieszanin popiołowo-wodnych o wysokich koncentracjach popiołu. Do badań zastosowano pompę o swo-

bodnym przepływie (według rozwiązania typu TURO), o średnicy króćca tłocznego d_t = =50 mm, średnicy króćca ssawnego d_s=65 mm i średnicy wirnika d_w=190 mm. Liczba łopatek wirnika wynosiła z=10, a ich szerokość b_w=21 mm. Pomiary przeprowadzono stosując specjalnie preparowane mieszaniny o średnich koncentracjach objętościowych c_v=0,10, 0,20, 0,25, 0,30, 0,35 i 0,40 oraz dla porównania wodę czystą [2]. Na podstawie pomiarów obliczono i określono charakterystyki pompy (wyrażając użyteczną wysokość podnoszenia pompy w m sł. mieszaniny).



Rys. 3. Wpływ koncentracji objętościowej popiołu w mieszaninie na parametry pracy pompy o swobodnym przepływie

Stwierdzono, że w przypadku pompowania wody, optymalna wydajność pompy wynosiła $Q_{opt}=8{,}89\cdot10^{-3}$ m³/s. Porównanie parametrów pracy pompy H, N i η przy różnych wartościach c_v, przeprowadzono przy stałych wydajnościach objętościowych wynoszących: 0,75 $Q_{opt}=6{,}67\cdot10^{-3}$ m³/s, $Q_{opt}=8{,}89\cdot10^{-3}$ m³/s i 1,25 $Q_{opt}=11{,}12\cdot10^{-3}$ m³/s, przedstawiając rezultaty na rysunku 3.

Stwierdzono, że wysokość podnoszenia pompy przy danej wydajności zmieniała się w granicach kilku procent, co odpowiada w zasadzie dokładności jej wyznaczenia. Można więc uznać, że w badanym zakresie zmienności koncentracji fazy stałej $c_v \leqslant 0{,}40$ pozostaje ona w przybliżeniu stała.

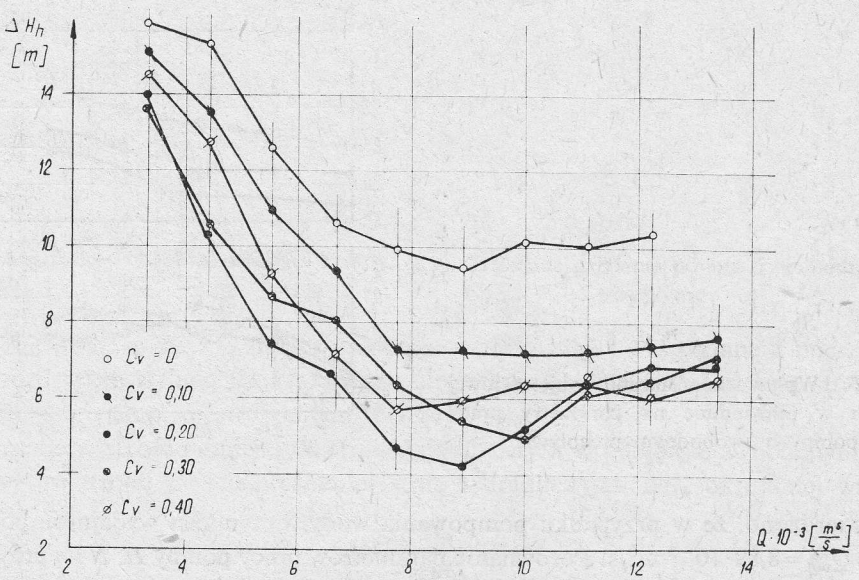
Moc na wale pompy zwiększa się ze wzrostem koncentracji objętościowej fazy stałej, ale wzrost ten jest wyraźnie wolniejszy niż wynikałoby to z zależności podanej przez Stepanoffa [9] dla pomp krętnych odśrodkowych przetłaczających mieszaniny jednorodne. Dowodzi to, że względnie biorąc, zmniejszają się straty związane z działaniem pompy.

W konsekwencji zwiększa się ze wzrostem c_v sprawność pompy, przy czym powyżej $c_v \approx 0{,}2$ jej wartość praktycznie się stabilizuje. Współczynnik $k_{\eta m}$ (5) przyjmuje więc w przedziale $0{,}2 < c_v < 0{,}4$ wartości w zakresie 1,20 do 1,35 (w zależności od wydajności).

Niewątpliwie jednak przy dalszym wzroście c_v nastąpi zmniejszenie się wysokości podnoszenia i sprawności pompy w wyniku wzrostu lepkości mieszaniny, wywołanej pojawieniem się nasilonych własności ciała plastyczno-lepkiego.

5. Analiza strat w trakcie działania pompy o swobodnym przepływie

Aby ocenić wpływ koncentracji fazy stałej na wielkość strat w przestrzeni bezłopatkowej pompy, przeanalizowano zależność $\Delta H_h = f(Q)$ dla różnych wartości c_v. Wielkość ΔH_h obliczono na podstawie zależności (8) i (9). Straty mocy N_m zmierzono bezpośrednio, natomiast straty tarcia N_f obliczono na podstawie zależności podanych w pracy [1]. Ponieważ $N_m + N_f \approx 0{,}05$ N, przeto ewentualne niedokładności ich określenia nie mają większego



Rys. 4. Zależność wysokości strat hydraulicznych w pompie o swobodnym przepływie od koncentracji objętościowej popiołu w mieszaninie

wpływu na dokładność dalszych rozważań. Zależności $\Delta H_h = f(Q)$ przedstawiono na rysunku 4. Wynika z nich, że straty mocy ΔH_h odniesione do jednostki ciężaru pompowanej cieczy osiągają największą wartość w przypadku wody, a znacznie zmniejszają się w przypadku mieszaniny. Ponieważ straty przepływowe będą w przybliżeniu takie same w przypadku tak wody jak i mieszaniny, przeto zmniejszeniu ulegną straty krążenia. Wymiana ilości ruchu zachodząca w trakcie mieszania się strumienia krążącego ze strumieniem głównym będzie bardziej efektywna w przypadku mieszaniny niż wody, a więc dyssypacja energii ulegnie zmniejszeniu. Pewnej analogii można się doszukiwać w wynikach badań Soo [8] nad efektywnością wymiany ilości ruchu między cząsteczkami fazy stałej a gazem.

6. Zakończenie

Wyniki przeprowadzonych badań dowodzą możliwości poważnego rozszerzenia zakresu zastosowań pomp o swobodnym przepływie. Sprawności tych pomp w przypadku pompowania drobnodyspersyjnych mieszanin ciał stałych w cieczach wyraźnie wzrastają i stają się wobec tego porównywalne ze sprawnościami osiąganymi przez pompy krętne odśrodkowe. Można jednak oczekiwać, że istnieje relacja między wielkością ziaren ciał stałych a ewentualnym wzrostem sprawności pompy; przy odpowiednio większych ziarnach przyrost sprawności zmaleje do zera, a następnie sprawność zacznie się obniżać. Jednakże, ze względu na charakter uziarnienia popiołów lotnych, pompy o swobodnym przepływie można z powodzeniem stosować do tłoczenia ich mieszanin z wodą.

Literatura

[1] J. W. Daily, R. E. Nece, *Chamber dimension effects on induced flow and frictional resistance of enclosed rotating discs*. Journal of Basic Engineering, Januar, 1960.

[2] T. Głuszko, K. Michalewicz, Praca dyplomowa wykonana pod kierunkiem J. Rokity, Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej, 1979.

[3] G. Grabow, *Untersuchungen an Freistrompumpen, Pumpen und Verdichter*, Internationales Symposium, Leipzig 1970.

[4] H. Ohba i in., *A Study on Performance and Internal Flow Pattern of a Vortex Pump*. Bulletin of the JSME, No. 162, December, 1978.

[5] J. Rokita, T. Szeliga, *Badania własności fizycznych mieszanin popiołowo-wodnych warunkujących ich zdolność do transportu rurowego*. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej „Energetyka", (w przygotowaniu do druku).

[6] J. Rokita, *Uogólnione kryterium zdolności pomp do przepuszczania ziaren ciał stałych*. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, „Energetyka" (w druku).

[7] G. P. Schivley, J. L. Dussourd, *An Analytical and Experimental Study of a Vortex Pump*, Journal of Basic Engineering, December, 1970.

[8] S. L. Soo, *Gas-Solid Flow*. Proc. of Symposium on Single and Multi-Component Flow Processes. New Brunswick, N. J. 1965.

[9] A. J. Stepanoff, *Pumping solid-liquid mixture*. Mechanical Engineering, September 1964, New York.

The Influence of Volume Concentration of Fly Ash in Water on the Working Parameters of a Torque-Flow Pump

Summary

The transport of ash is an important problem of operation of thermal power plants. Hydraulic transport of a water-ash mixture of possibly high volume concentration of solid phase is a solution favourable from the point of view of economy.

Results of extensive experimental investigations of the influence of ash volume concentration on operating parameters of a torque-flow pump are presented. Laboratory and field measurements have been conducted.

It was shown that for the volume concentration $C_v = 0.3$ the influence of solid phase on the non-dimensional head/discharge and efficiency/discharge curves is negligible, rising substantially for $0.3 \leqslant C_v \leqslant 0.48$.

This influence was analyzed in connection with rheological properties of the mixture. Distinct non-Newtonian properties of the mixture for higher values of C_v were ascertained.

Влияние объемной концентрации летных пепелов в воде на параметры работы насоса со свободным протоком

Резюме

Важной проблемой в теплоэлектростанциях является доставка пепелов до места предназначения.

Экономически обоснованным способом доставки является применение гидравлического транспорта смеси пепелов с водой, характеризующейся возможно высокой объемной концентрацией твердой фазы.

Представлены результаты обширных экспериментальных исследований влияния объемной концентрации пепела на параметры работы насоса со свободным протоком.

Исследования проводились в лабораторных и промышленных условиях.

Доказывается, что для объемной концентрации $C_v \leqslant 0{,}3$ влияние твердой фазы на безразмерные характеристики протока и к.п.д. насоса пренебрежимо, а значительно возрастает для $0{,}3 \leqslant C_v \leqslant 0{,}48$.

Анализировалось это влияние на фоне исследований реологических свойств смеси, отчетливо констатируя ее неньютоновские свойства при больших значениях C_v.