

- Confección de un mapa con la regionalización según los criterios de ubicación de obras bajo tierra y señalamiento de los lugares prospectivos para este objetivo.
- Confección de un listado con todas las obras que se considere ventajoso ubicar bajo tierra teniendo en cuenta las limitaciones de espacio en la superficie y la conservación del medio circundante.
- Estudio de todas las excavaciones subterráneas existentes en nuestro país con el objetivo de evaluar la posibilidad de su utilización con estos fines.
- Elaboración de una metodología que permita fundamentar desde el punto de vista técnico-económico el uso de diferentes excavaciones para estos objetivos.

REFERENCIAS

1. DOBINA A. S. y N. A. EVSTROPOV; Construcción de depósitos subterráneos, Moscú, 1967 (en ruso).
2. ZILBERBORD A. F., G. G. GORSCAIA y M. A. GORODESTCAIA: Régimen térmico de las construcciones subterráneas y condiciones ingeniero-geológicas. Su ubicación óptima (en ruso).
3. PANIENKOV Y. I.: "Conferencias sobre el aprovechamiento de los espacios subterráneos". ISMMMoa, 1983.
4. STARSHIN A. P.: "Problemas de la asimilación de los espacios subterráneos en el territorio del país". Construcción de Minas, no 9, Moscú, 1980 (en ruso).
5. Compendio de trabajos del congreso sobre la utilización de los espacios subterráneos. Oxford 77, vol. 1, 2 y 3, Estocolmo, Suecia (en ruso).
6. _____ "Menas de cobre en Perú y Chile". Metalurgia no Ferrosa, no. 3, Moscú, 1971.

CDU: 622.648:622.764 (729.1)

SOBRE LA ELECCION DE CRITERIOS DE SEMEJANZA HIDRODINAMICA APLICADOS AL TRANSPORTE HIDRAULICO

RESUMEN

En el trabajo se precisa el campo de aplicación de criterios conocidos de semejanza hidrodinámica para modelar el movimiento de hidromezclas de gran densidad altamente saturadas.

Sobre la base de datos experimentales se demuestra que la aplicación del número de Froude para partículas sólidas como criterio de semejanza puede conducir a resultados erróneos, y que forma parte de una magnitud dimensional más general con la que se han obtenido dos nuevos criterios que no sólo reflejan la influencia del peso, tamaño, forma y dimensiones lineales de las partículas sólidas, sino que, además, incluyen otros factores de especial importancia.

Como resultado se establecen las condiciones necesarias para modelar el movimiento de diferentes tipos de hidromezclas.

О ВЫБОРЕ КРИТЕРИЕВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ПРИМЕНИТЕЛЬНО
К ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ ТРАНСПОРТУ

Резюме

В работе уточняется область применения известных критериев гидродинамического подобия для моделирования движения высоконасыщенных гидросмесей большой плотности.

На основании экспериментальных данных устанавливается, что использование числа Фруда для твердых частиц в качестве критерия подобия может приводить к ошибочным результатам, и что этот параметр входит в более общую размерную величину, с помощью которой были получены два новых критерия, которые отражают не только вес, величину, форму и линейные размеры твердых частиц, но и включают другие факторы, имеющие специальное значение.

Как результат этого, устанавливаются необходимые условия для моделирования движения различных типов гидросмесей.

SELECTION OF HYDRODYNAMIC LIKENESS CRITERIA
APPLIED TO HYDRAULIC TRANSPORTATION MEANS

ABSTRACT

This work points out the field of application of known hydrodynamic likeness criteria to model the transportation of highly saturated high density hydromixtures.

Based on experimental data, it is proved that the application of the Froude number for solid particles, as

a likeness criterium may lead to erroneous results. It is also proved that the Froude number is part of a more general dimensional magnitude, from which two new criteria have been derived, which not only show the influence of the solid particles weight, size, form and linear dimensions, but also that include other factors of special importance.

As a result, it is determined the necessary conditions for modeling the transportation of the different types of hydro-mixtures.

SOBRE LA ELECCION DE CRITERIOS DE SEMEJANZA
HIDRODINAMICA APLICADOS AL TRANSPORTE HIDRAULICO

Rafael Pérez Barreto
Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas
Profesor Titular del ISMMMoA

Svietlana Maliuk
Ingeniera
Profesora Auxiliar del ISMMMoA

Para determinar los parámetros del transporte de sólidos suspensos en hidroflujos existen múltiples expresiones empíricas, mediante las cuales se obtienen resultados satisfactorios dentro de ciertos límites, pero que pierden fiabilidad en la medida en que las características de los materiales e hidromezclas, así como las dimensiones de los conductos, se diferencian de aquellas con las cuales fueron obtenidas estas expresiones.

Con el crecimiento industrial se incrementan la variedad y el volumen de los productos hidrotransportados, aumentan las distancias de tiro, y se crea la necesidad de determinar los parámetros racionales para el proyecto de

nuevas instalaciones o la reconstrucción de las ya existentes. Este problema no siempre tiene una solución de cálculo aceptable, lo que obliga a realizar gran cantidad de pruebas experimentales.

La realización de estas pruebas en instalaciones de pequeño tamaño las simplifica, permite obtener resultados más precisos, disminuye los costos y el tiempo de la experimentación; pero el traslado de estos resultados a instalaciones industriales, de mayor tamaño, se dificulta debido a la poca fiabilidad de los criterios de semejanza conocidos.

En el presente trabajo se precisa el campo de aplicación de algunos criterios de semejanza aplicados al transporte hidráulico, y se establecen las condiciones de modelación de flujos heterogéneos de gran concentración con partículas sólidas de alta densidad.

Para generalizar los resultados de los experimentos de hidromezclas en movimiento se utilizan en calidad de criterios de semejanza hidrodinámica, parámetros bien conocidos para líquidos homogéneos, pero cuyo comportamiento con pulpas, especialmente de alta concentración con partículas de gran densidad, está aún insuficientemente estudiado; ellos son:

$$Re = \frac{UD\rho}{\mu}; Fr = \frac{U^2}{gD}; C = \frac{i}{\rho g l}$$

así como expresiones adimensionales obtenidas para líquidos heterogéneos [4]:

$$\Pi_1 = \frac{UD}{Wd}; \Pi_2 = \frac{D^2}{\rho(wd)^2}$$

donde: U - velocidad media del flujo; m/s
D - diámetro del conducto; m

ρ - densidad de la hidromezcla; kg/m³
 μ - viscosidad absoluta; $\frac{N \cdot s}{m^2}$

g - calcinación gravitacional; g = 9,8 m/s²

i - pérdidas de carga; N m²/m

W - tamaño hidráulico de las partículas sólidas; m/s

d - diámetro medio de las partículas sólidas; m

La utilización de uno u otro parámetro se determina por la clase de hidromezcla y por su régimen de movimiento. Lo acertado de una elección se puede comprobar sólo experimentalmente.

Los parámetros Fr, C, Π_1 y Π_2 presentan gran interés para nuestro análisis. Para su utilización en calidad de criterio de semejanza hidrodinámica cuando se generalizan los resultados experimentales es necesario, previamente, establecer mediante ensayos el posible campo de su aplicación, cuando se transportan en hidromezclas de gran concentración partículas sólidas de alta densidad. Además, es necesario fundamentar experimentalmente la racionalidad de la elección del parámetro Wd en calidad de magnitud característica que refleja las propiedades físico-mecánicas de las partículas sólidas.

Un gran volumen de las investigaciones experimentales que se encuentran en la literatura ratifican la influencia de la forma, el peso y el tamaño de las partículas sólidas, así como también de las dimensiones lineales en los parámetros de los flujos heterogéneos. Sin embargo, en los criterios utilizados en la elaboración de estos datos, con frecuencia no se incluyen las magnitudes que reflejan estas propiedades de las partículas sólidas, o se incluyen en detrimento de otros factores no menos importantes, que influyen en el sistema en su conjunto. En otros casos

se incluyen de tal manera, que no caracterizan las partículas sólidas. El más difundido de los parámetros pertenecientes a los criterios del primer grupo es el número de Froude para partículas sólidas:

$$Fr^* = \frac{W^2}{gd}$$

Este parámetro fue tratado en [4]. En el presente trabajo analizaremos las causas complementarias por las cuales esta magnitud no puede ser criterio de semejanza hidrodinámica para un gran número de clases de hidromezclas. Simultáneamente se demuestra la elección acertada del parámetro Wd en calidad de magnitud característica que refleja las propiedades físico-mecánicas de las partículas.

TABLA 1. Relación $W = f(d)$ en la zona laminar.

Material: Concentrado magnetítico $\rho = 4700 \text{ kg/m}^3$			
d, cm	W; cm/s	$d^2 \cdot 10^{-4}$	W/d^2
(1)	(2)	(3)	(4)
0,001	0,0148	0,0100	$\frac{W}{d^2} = 148 \cdot 10^3 = \text{const}$
0,0015	0,0335	0,0225	
0,002	0,0595	0,04	
0,003	0,134	0,08	
0,004	0,237	0,16	
0,005	0,366	0,25	
0,006	0,530	0,36	
0,007	0,720	0,49	
0,008	0,940	0,64	
0,009	1,220	0,81	
0,010	1,465	1,00	
0,012	2,110	1,44	
0,015	3,350	2,25	

En la Tabla 1 se dan los valores del tamaño hidráulico para diferentes diámetros de partículas de concentrado de hierro. Los valores W se han tomado de la tabla de Goncharov [1] confeccionada sobre la base de datos experimentales. Repetir estos ensayos es innecesario, ya que su fiabilidad ha sido ratificada por las investigaciones de otros autores [3], cuyos resultados concuerdan bastante bien con los datos de Goncharov.

En las Tablas 2 y 3 se dan los valores del tamaño hidráulico para partículas de mineral de hierro con una densidad $\rho = 3570 \text{ kg/m}^3$.

TABLA 2. Relación $W = f(d)$ zona de transición.

Material: Mineral de hierro $\rho = 3570 \text{ kg/m}^3$			
d, cm	W; cm/s	C	$\frac{W+C}{d}$
(1)	(2)	(3)	(4)
0,015	2,31	$C = 0,91$	$\frac{W+C}{d} = 174 = \text{const}$
0,020	3,180		
0,030	4,930		
0,040	6,690		
0,050	8,400		
0,060	10,150		
0,070	11,850		
0,080	13,620		
0,090	15,420		
0,10	17,150		
0,12	20,600		
0,15	25,90		

TABLA 3. Relación $W = f(d)$ en la zona turbulenta.

d, cm	W cm/s	W ²	W ² /d
(1)	(2)	(3)	(4)
0,15	20,60	425	
0,175	22,27	500	
0,20	23,72	560	
0,25	26,60	705	
0,30	29,20	850	
0,40	33,60	1 130	
0,50	37,55	1 400	
0,60	41,10	1 690	
0,70	44,50	1 990	
0,80	47,50	2 250	
0,90	50,04	2 502	
1,00	53,20	2 800	
1,25	58,100	3 440	
1,5	65,00	4 225	
1,75	70,20	4 920	
2,00	75,20	6 675	
2,5	84,00	7 056	

$\frac{W^2}{d} = 2 852 = \text{const}$

El análisis de estos datos muestra que para un mismo material se cumplen las siguientes relaciones:

$$\frac{W}{d^2} = \text{const}; \frac{W}{d} + \frac{C}{d} = \text{const}; \frac{W^2}{d} = \text{const} \quad (1)$$

correspondientes a las regiones laminar, de transición y turbulenta respectivamente, cuyos límites se determinan principalmente por el diámetro de las partículas.

De este grupo de relaciones (1) se evidencia que la expresión $F_2^* = \frac{W^2}{d}$ es constante para partículas con diámetro $d \geq 1,5$ mm.

Por otra parte, para las partículas $d \geq 0,15$ mm se tiene:

$$\frac{W^2}{d} = \frac{W}{d^2} \cdot Wd = CWd \quad (2)$$

donde:

C - magnitud constante para un mismo material.

En este caso $C = \frac{W}{d^2}$.

Por todo lo antes expresado es evidente que el parámetro $\frac{W^2}{d}$ no puede ser utilizado como criterio de semejanza para hidromezclas que contienen partículas sólidas con diámetro $d \geq 1,5$ mm. En el campo de hidromezclas finamente dispersas, el número de Froude, para partículas sólidas, es una constante adimensional de una magnitud dimensional más general. El producto Wd elegido por nosotros es precisamente esta magnitud característica dimensional, que debe incluirse en los criterios que reflejan las propiedades físico-mecánicas de las partículas sólidas, tanto en las hidromezclas finamente dispersas ($d \leq 0,15$ mm) como en las gruesas. En efecto:

$$Wd = \frac{Wd \cdot dW}{dW} = \frac{W^2}{d} / \frac{W}{d^2} \quad (3)$$

de las ecuaciones (2) y (3) tenemos:

Para partículas $d \geq 1,5$ mm

$$Wd = \text{const} \frac{W}{d^2}$$

Para partículas $d \leq 0,15$ mm

$$Wd = \text{const} \frac{W^2}{d}$$

Para la región de transición $0,15 < d < 1,5$:

$$Wd \neq \frac{W}{d} + \frac{c}{d} = \text{const}$$

Para establecer la posibilidad de aplicación de los parámetros adimensionales señalados, en calidad de criterios de semejanza para hidromezclas de diferentes densidades que contienen concentrados magnéticos, se llevaron a cabo experimentos, cuyos resultados se muestran en la Tabla 4.

TABLA 4. Relación $i = f(U)$.

Diámetro del conducto					
D = 0,08 m		D = 0,1 m		D = 0,202 m	
$\rho = 1\ 250\ \text{kg/m}^3 \quad \mu = 0,0024\ \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$					
$i, \text{N/m}^2$	U, m/s	$i, \text{N/m}^2$	U, m/s	$i, \text{N/m}^2$	U, N/s
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
840	1,92	181	0,99	181	1,41
653	1,75	236	1,14	234	1,61
490	1,52	328	1,37	322	1,93
342	1,30	408	1,53	407	2,24
274	1,19	479	1,66	470	2,56
210	0,99	530	1,74	530	2,66
152	0,82	625	1,85	620	3,00
274	1,10	715	2,03	715	3,36
372	1,25	790	2,12	795	3,50
490	1,44	915	2,26	915	3,78
823	1,88	700	2,00	510	2,73
1 125	2,33	500	1,72	300	2,07
1 240	2,36	300	1,29	206	1,61
1 390	2,60	206	1,08	162	1,4
900	1,93	162	0,98	-	-
695	1,68	-	-	-	-
540	1,46	-	-	-	-
365	1,25	-	-	-	-

TABLA 4. (Continuación.)

$\rho = 1\ 600\ \text{kg/m}^3 \quad \mu = 0,005\ \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1 410	2,12	627	1,70	162	1,16
1 225	2,00	573	1,60	236	1,34
1 000	1,87	485	1,45	299	1,57
910	1,72	392	1,29	339	1,68
745	1,52	307	1,13	416	1,92
627	1,43	229	0,97	456	2,08
422	1,20	271	0,86	599	2,52
298	1,09	210	0,94	780	3,01
264	0,96	232	1,17	961	3,30
363	1,14	384	1,27	829	3,13
461	1,24	470	1,43	726	2,87
569	1,38	520	1,54	614	2,75
696	1,52	598	1,63	486	2,29
950	1,79	636	1,73	363	1,85
1 110	1,95	-	-	235	1,47
-	-	-	-	172	1,20

$\rho = 1\ 850\ \text{kg/m}^3 \quad \mu = 0,008\ \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}$					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
324	0,95	304	0,99	204	1,14
510	1,24	362	1,13	262	1,28
705	1,42	442	1,26	388	1,66
890	1,64	505	1,32	452	1,82
1 020	1,72	584	1,42	505	1,96
1 150	1,87	650	1,52	622	2,26
1 190	1,94	800	1,78	728	2,50
1 070	1,83	666	1,61	960	2,90
880	1,61	594	1,50	900	2,80
725	1,43	554	1,44	690	2,18
588	1,34	466	1,31	592	2,02
430	1,19	392	1,17	406	1,66
3 124	0,96	354	1,08	340	1,42
433	1,13	-	-	208	1,18

En la Figura 1 se muestra la distribución de las pérdidas de carga en función del número de Reynolds $i = f(\text{Re})$. Las investigaciones se realizaron en tubos con diámetros $D = 80, 100$ y 202 mm con hidromezclas de densidades desde $\rho = 1\ 200$ hasta $\rho = 2\ 100$ kg/m^3 y con una concentración volumétrica del sólido en la hidromezcla que varió desde 6 hasta 30 %.

Como se ve en el gráfico los puntos no se sitúan en una misma curva, lo que muestra la ausencia de una dependencia única para diferentes diámetros del conducto. Los experimentos ratifican la poca utilidad del número de Reynolds como criterio de semejanza para hidromezclas de alta concentración.

En las Figuras 2, 3 y 4 se muestran las dependencias de las pendientes hidráulicas del parámetro de Froude $i = f(\text{Fr})$ para hidromezclas que contienen partículas sólidas con diámetros $d = 0,05$ mm.

La densidad media de la pulpa fue $\rho = 1\ 250; 1\ 600$ y $1\ 850$ kg/m^3 respectivamente. Estas relaciones se obtuvieron en tubos con diámetros de 80, 100 y 202 mm.

Los puntos experimentales obtenidos yacen muy bien sobre una recta en el campo de relativamente pequeños valores del número de Froude. En la medida en que aumenta Fr los puntos se separan de tal manera que mientras menor es el diámetro del tubo, más altos se sitúan los puntos. Los valores del número de Froude $\text{Fr}_{\text{crítico}}$ con los cuales los

puntos comienzan a separarse visiblemente dependen de la densidad media de la hidromezcla y constituyen para:

densidad kg/m^3	número de Froude crítico
$\rho = 1\ 250$	$\text{Fr} = 1,9$
$\rho = 1\ 600$	$\text{Fr} = 2,1$
$\rho = 1\ 850$	$\text{Fr} = 2,3$

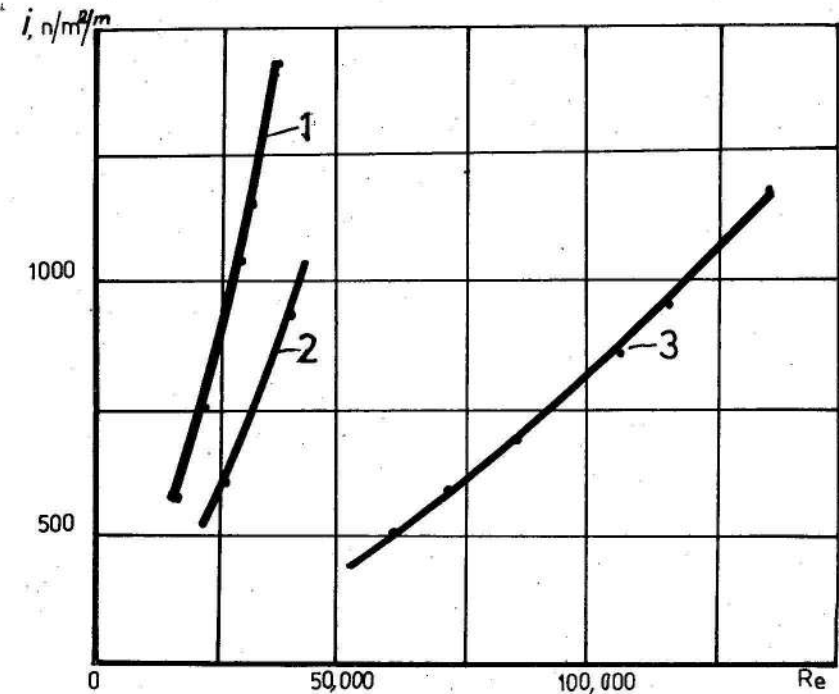


Fig. 1. Gráfico de las pendientes hidráulicas en función del número de Reynolds $i = f(\text{Re})$ en tubos con diámetro 1) 80 mm; 2) 100 mm; 3) 202 mm.

Densidad de la hidromezcla $\rho = 1\ 800$ kg/m^3 ; densidad de las partículas sólidas $\rho = 4\ 700$ kg/m^3 ; $d = 0,005$ mm.

En estos límites del valor de Fr para las densidades señaladas la condición suficiente de semejanza hidrodinámica es la siguiente:

$$i = \text{idem} \quad Fr = \text{idem}$$

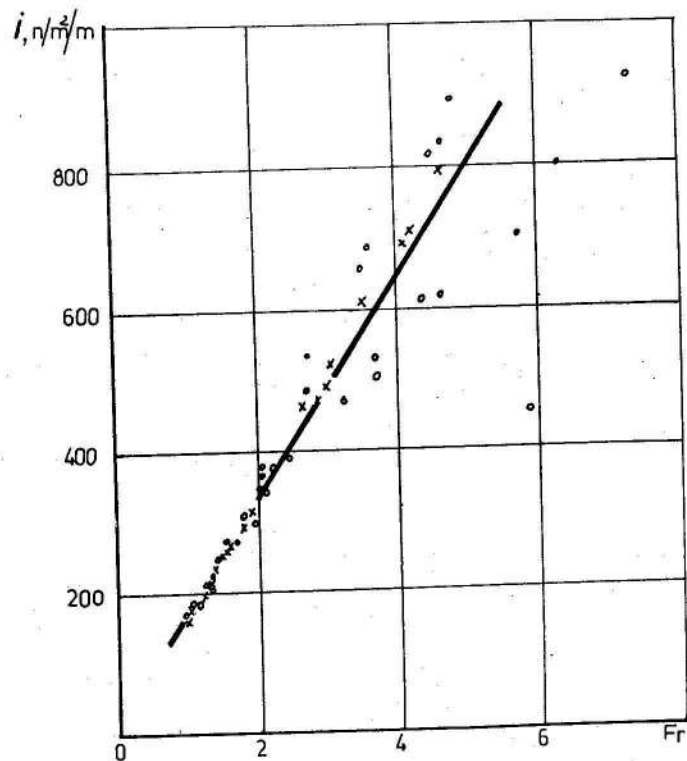


Fig. 2. Gráfico de las pendientes hidráulicas en función del número de Froude $i = f(Fr)$.

Material sólido: concentrado de hierro $\rho = 4\,700 \text{ kg/m}^3$,
 $d = 0,05 \text{ mm}$. Diametros de los conductos: \cdot - 80 mm;
 \times - 100 mm; \circ - 202 mm. Densidad de la hidromezcla
 $\rho = 1\,250 \text{ kg/m}^3$.

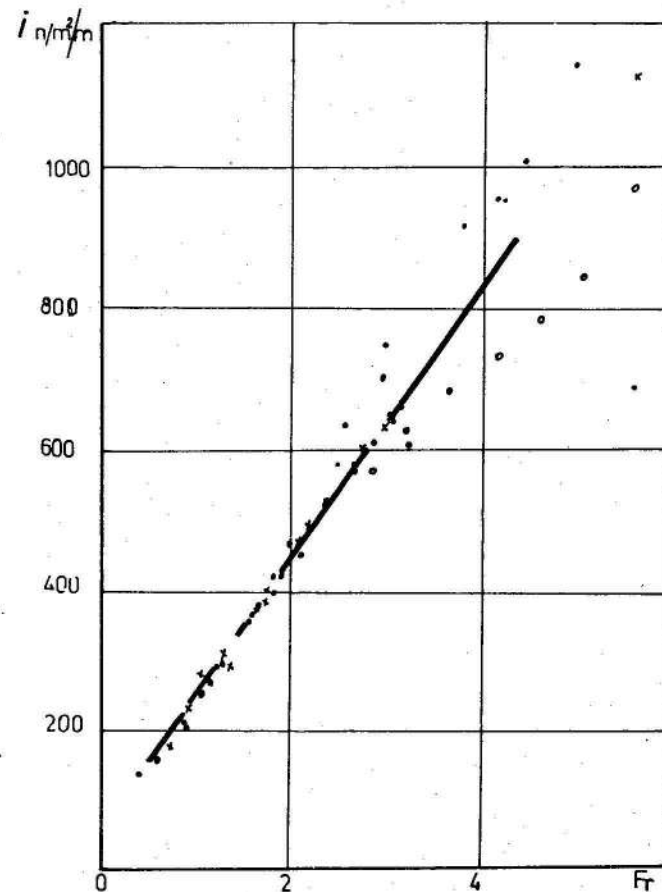


Fig. 3. Gráfico de la relación de las pendientes hidráulicas en función del número de Froude $i = f(Fr)$.

Material sólido: concentrado de hierro $\rho = 4\,700 \text{ kg/m}^3$,
 $d = 0,05 \text{ mm}$. Diametros de los tubos: \cdot - 80 mm;
 \times - 100 mm; \circ - 202 mm. Densidad de la hidromezcla
 $\rho = 1\,600 \text{ kg/m}^3$.

La elaboración matemática de los datos de los ensayos se ha obtenido para la densidad de la hidromezcla $\rho = 1\,850 \text{ kg/m}^3$. En las regiones donde $Fr \leq Fr_{\text{crítico}}$

se obtiene una relación lineal de la función $\dot{l} = f(F_2)$, que responde a la siguiente ecuación empírica de enlace:

$$\dot{l} = a Fr + b \quad (4)$$

donde:

$$a = 227 \quad b = 92$$

En este caso el coeficiente de correlación $R = 0,99$ y su posible error $\mathcal{E} = 0,0032$.

Este resultado muestra lo indiscutible del enlace lineal entre los índices \dot{l} y Fr para todos los diámetros de tuberías investigados en el campo $Fr \leq Fr_{\text{crítico}}$. La fiabilidad del coeficiente de correlación es $305 \gg 2,6$ y demuestra que el enlace hallado es fiable.

En la ecuación (4) el valor de b se determina por el coeficiente de resistencia a la fricción. La magnitud a dependerá fundamentalmente de la densidad de la hidromezcla.

Con el objeto de investigar el comportamiento de Fr en función de la densidad de la hidromezcla se realizaron ensayos en tubos con diámetros de 80, 100 y 202 mm para valores de la pendiente hidráulica $\dot{l} = 250; 400$ y 600 N/m^2 . Los resultados de estos experimentos se muestran en la Figura 5 en forma de curvas $Fr = f(\rho)$. En ellas se ve que con la pendiente hidráulica $\dot{l} = 250 \text{ N/m}^2$ los puntos experimentales obtenidos en todos los tubos se sitúan muy bien en una curva. Con la pendiente hidráulica $\dot{l} = 400 \text{ N/m}^2$ los puntos se sitúan en una curva sólo para un relativamente gran valor de la densidad $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$.

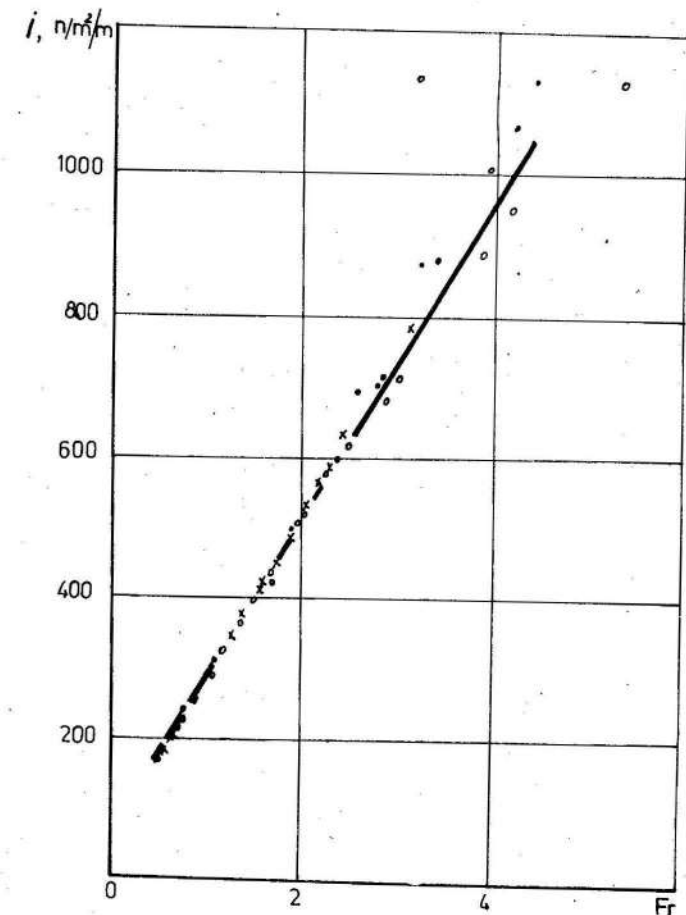


Fig. 4. Gráfico de las pendientes hidráulicas del número de Froude $\dot{l} = f(Fr)$. Material sólido/concentrado de hierro $\rho = 4700 \text{ kg/m}^3$; $d = 0,05 \text{ mm}$. Diámetro de los tubos: \bullet - 80 mm; \times - 100 mm; \circ - 202 mm. Densidad de la hidromezcla $\rho = 1850 \text{ kg/m}^3$.

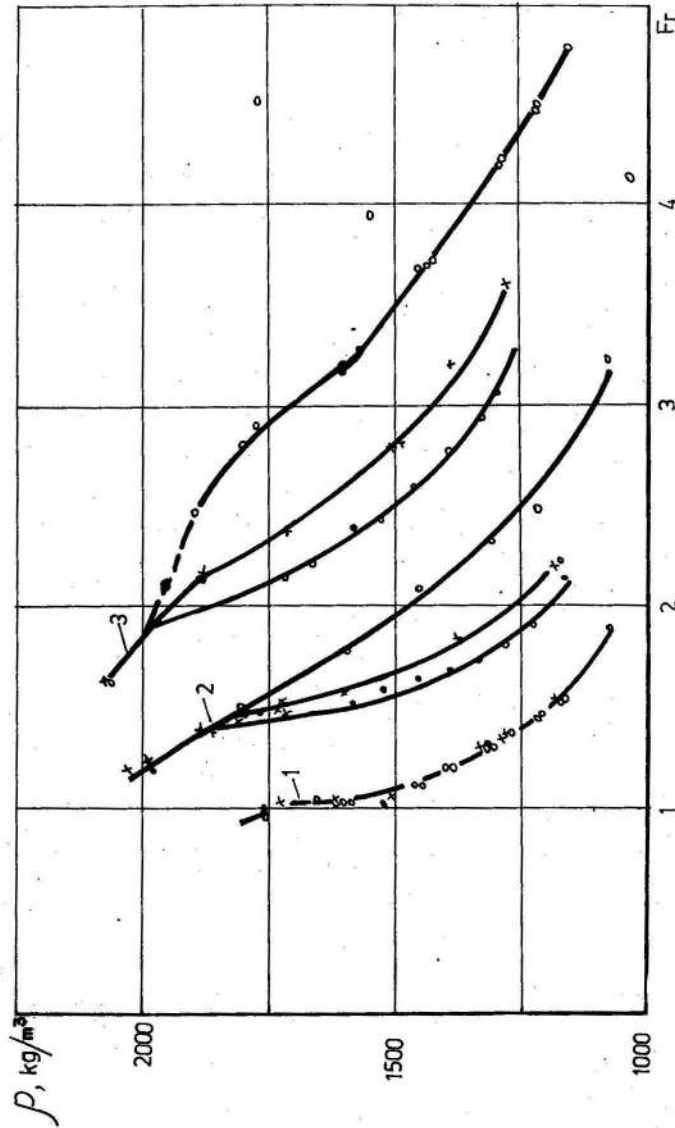


Fig. 5. Gráfico del número de Froude en función de la densidad de la hidromezcla $Fr = f(\rho)$. Material: concentrado de hierro $\rho = 4700 \text{ kg/m}^3$; $d = 0,05 \text{ mm}$. Pendiente hidráulica: 1) 250; 2) 400 y 3) 600 N/m^2 . Diámetro de los tubos: \circ - 800 mm; \times - 100 mm; \triangle - 202 mm.

Por debajo de esta magnitud los puntos se separan. Para $i = 600 \text{ N/m}^2$, el valor de la densidad con la cual los puntos se sitúan en una curva será $\rho \geq 2000 \text{ kg/m}^3$.

En conclusión, para las hidromezclas finas dispersas de alta concentración con velocidades medias de movimiento $U \approx U_{\text{crítico}}$ la condición suficiente de semejanza hidrodinámica es:

$$i = \text{ídem} \quad Fr = \text{ídem} \quad (5)$$

Para las velocidades medias, anteriormente señaladas, aparece una región donde la condición (5) es insuficiente. Modelar estos regímenes con hidromezclas que contienen las mismas partículas sólidas no es posible, ya que el coeficiente de escala de los parámetros Fr y Π se diferencia como se demostró en [4].

En la práctica no hay necesidad de transportar materiales sólidos con velocidades de la hidromezcla dos veces mayores que la crítica. Por esto para investigar hidromezclas finas dispersas, cuando se elaboran los resultados de los experimentos se puede utilizar la condición (5).

La condición (5) puede ser insuficiente, ya sea para grandes factores de la velocidad media o para diámetros de las partículas mayores, $d \geq 0,15 \text{ mm}$. En estos casos la condición de semejanza debe ser:

$$i = \text{ídem} \quad Fr = \text{ídem} \quad \Pi_1 = \text{ídem} \quad (6)$$

Por otra parte, es necesario determinar el límite de la relación entre los diámetros con el cual la condición (5) constituye un criterio suficiente de semejanza hidrodinámica.

mica para el caso en que se realiza el experimento con el mismo material que se modela.

De acuerdo con los datos de las Tablas 1, 2 y 3, cuando se modela con el mismo material, el tamaño hidráulico de las partículas sólidas se puede expresar mediante su diámetro.

Tomando en consideración las ecuaciones (1) y (6) para hidromezclas compuestas con partículas de diámetro $0,05 \leq d < 0,15$ se tiene:

$$\frac{U_n D_n}{W_n^2 d_n} = \frac{U_m D_m}{W_m^2 d_m}$$

Considerando:

$$\frac{U_n}{U_m} = \lambda_u = \lambda_1^{0,5}$$

Se obtiene:

$$\lambda_1 = \lambda_d^{1,5} \quad (7)$$

Es decir, la relación de los diámetros de los tubos debe ser en una potencia igual a 1,5 veces mayor que el coeficiente escalar de los diámetros de las partículas.

Por otra parte, es conocido que la relación entre los diámetros límites de las partículas que puedan pasar por el tamiz es igual a 2. Entonces la mayor relación entre los diámetros para los cuales será acertado el resultado obtenido mediante la modelación del material de una clase de la expresión (7) será:

$$\frac{D_n}{D_m} = 2^{1,5} = 2,82$$

Si en lugar de los diámetros límites se elige cualquier valor promediado, este intervalo se estrecha algo.

En el intervalo señalado por nosotros la relación entre los diámetros límites de las partículas es igual a 3. Pero como quiera que la determinación del diámetro medio y la medición de los parámetros del movimiento de las hidromezclas tienen un error del mismo orden, prácticamente se puede desprestigiar la influencia del diámetro de las partículas si se mantiene el coeficiente escalar:

$$\lambda_D \leq 2,82$$

Esta situación se reafirma con los experimentos realizados por nosotros [5].

Para diámetros de las partículas naturales 2,82 veces mayores que las del modelo la condición (5) es insuficiente y se hace necesario cumplir la condición (6).

Para las regiones de transición y turbulencias tendremos:

$$\lambda_D^{1,5} = \frac{d_n^2}{d_m^2} + \frac{d_n}{d_m} \quad \text{y} \quad \lambda_D = \lambda_d$$

De aquí se desprende que el valor del coeficiente escalar de los diámetros de la tubería es cercano, o del mismo orden del valor de la relación de los diámetros de las partículas.

Esto demuestra la necesidad de considerar la influencia de los diámetros de las partículas sólidas para las hidromezclas gruesas dispersas.

Evidentemente la condición (5) es necesaria para modelar el movimiento de partículas suspensas en un flujo líquido, cuyo diámetro es inferior que 3 - 4 mm.

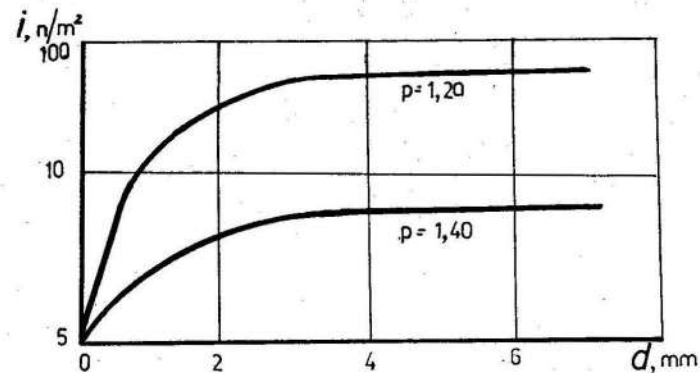


Fig. 6. Gráfico de la pendiente hidráulica en función del tamaño de las partículas transportadas $i = f(d)$.

Los experimentos muestran que, en el intervalo de los diámetros de las partículas mayores que 3 - 4 mm su variación no conduce a cambios notables en la pendiente hidráulica (Figura 6), aunque este límite se refiere a un material rigurosamente clasificado por tamaño y se puede aumentar con el incremento de la densidad de la mezcla.

El término introducido por nosotros Π_2 puede ayudarnos a determinar el carácter de la dependencia $i = f(d)$ para hidromezclas heterogéneas, de acuerdo con el tamaño de las partículas. En efecto:

$$\frac{i D^2}{P(Wa)^2} = \text{idem}$$

Para hidromezclas finas dispersas se puede escribir:

$$\lambda_i = \lambda_D \lambda_p \lambda_d$$

De tal manera, en el límite $d \leq 0,15$ la relación de las pérdidas de carga es proporcional al cubo de la desviación de los diámetros de las partículas. En este campo una variación pequeña del diámetro de las partículas conduce a grandes cambios de la pendiente hidráulica.

Para hidromezclas gruesas dispersas:

$$\lambda_i = \lambda_1 \lambda_p (\lambda_d^2 + c \lambda_d)$$

es decir, en el campo desde $0,15 < d < 1,5$ mm la escala de las resistencias hidráulicas varía en función de la relación de los diámetros de las partículas por una ley de segundo orden.

C - magnitud constante en la cual, junto a otros factores se incluye la densidad relativa de la hidromezcla

$$\frac{\rho_m - \rho_o}{\rho_o}$$

donde:

ρ_m y ρ_o densidades de la mezcla y del agua respectivamente.

Para las hidromezclas gruesas:

$$\lambda_i = \lambda \frac{\lambda^2 \lambda^{3/2}}{\rho D d}$$

Esto significa que para $d \geq 1,5$ mm la variación del diámetro de las partículas sólidas influye mucho menos en la magnitud de la pendiente hidráulica que en las zonas laminar y de transición.

En la figura 6 se muestra la dependencia experimental $i = f(d)$, por los datos del trabajo [2], para materiales rigurosamente fraccionados por su tamaño.

Las curvas en el gráfico corresponden por su carácter a las mismas funciones observadas por otros autores [6].

El carácter de la dependencia obtenida por nosotros para diferentes zonas de tamaño coincide muy bien con estas curvas empíricas.

Se puede concluir que las investigaciones experimentales reafirman nuestras conclusiones del trabajo [4]. Además, establecen el campo de aplicación de los criterios de semejanza hidrodinámica, tanto los conocidos como los obtenidos por el autor.

La modelación de flujos con partículas en suspensión es realizable, y la fiabilidad de los resultados obtenidos de esta manera dependerá de la precisión de los experimentos.

De tal manera, la modelación de flujos heterogéneos es real. Para las hidromezclas altamente saturadas, finas, dispersas de gran densidad, que se mueven con velocidades cercanas a las críticas, cuando $\lambda_o \leq 2,82$ es suficiente cumplir la condición (5), es decir modelar por el número de Froude. Para las hidromezclas gruesas es necesario cumplir la condición complementaria propuesta por el autor y que se incluye en el sistema (6). Esto es posible sólo cuando se modelan hidromezclas que contienen partículas sólidas diferentes por su tamaño hidráulico y diámetro a aquellas que contienen la hidromezcla modelada. Por tanto, no hay posibilidades de modelar con el mismo líquido.

REFERENCIAS

1. EVDOKIMOV, P. D.: Proyecto y explotación de las instalaciones para colas en la fabrica de beneficio. Gostejizgat, Moscu, 1960.
2. KRAČNIK, V. M. y otros: "Investigación de flujos homogéneos y con partículas en suspensión". Investigaciones experimentales del hidrot transporte de materiales de grano grueso fraccionado. Ed. NAYKOVA DUMKA. Kiev, 1967.

3. KURBATOV, A. K.: Material referativo del trabajo de disertación, Moscú, 1967.
4. PEREZ BARRETO, R.: "Investigaciones sobre los criterios de semejanza hidrodinámica aplicados al transporte hidráulico" en Revista Minería y Geología no. 2, ISMMMOa, 1983.
5. PEREZ BARRETO, R.: "Investigación de los parámetros del transporte hidráulico de minerales y concentrados en flujos de alta concentración". Disertación en búsqueda del grado de Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas. Krivoy Rog, 1970.
6. YUFIN, A. P.: Hidromecanización. Gostejizdat, Moscú, 1965.

CDU: 622.73:621.926 (729.1)

TRITURACION Y MOLIENDA DE LOS MINERALES DE HIERRO DE MINA CHIQUITA

RESUMEN

En el presente trabajo se ha realizado un estudio de laboratorio encaminado a determinar la variante óptima de preparación mecánica de los minerales del sur de Santiago de Cuba, teniendo en cuenta los elementos teóricos de la bibliografía especializada.

Se dan algunas propiedades físicas del mineral, como son densidad, peso volumétrico y categoría de triturabilidad, las cuales determinan el proceso de beneficio a emplear.

Se realiza un estudio de la molibilidad para determinar la influencia de determinados factores sobre la misma, tales como: área y diámetro de los elementos triturantes, tamaño del mineral alimentado y tiempo de molienda; además se obtuvo una ecuación de la cinética de la molienda.