

3. Se observó que en la granulometría de la estructura metálica, tiene gran influencia la velocidad de enfriamiento. A mayor velocidad de enfriamiento la microestructura de la aleación es más fina.
4. El volumen general de contracciones de las aleaciones disminuyó al aumentar el contenido de cobre hasta el correspondiente al punto de eutéctica.
5. Se demostró que en las aleaciones de aluminio-cobre, la porosidad no determina la neumorresistencia de las piezas fundidas.
6. Es recomendable trabajar en la búsqueda de un modificador que disminuya la fragilidad de las aleaciones cercanas a la eutéctica, de modo que se puedan utilizar industrialmente, ya que prácticamente en ellas no se forman poros.

#### REFERENCIAS

1. ARUTINIAN, V. N.: "Investigación de las regularidades de las variaciones volumétricas en la cristalización de las aleaciones de sistemas dobles". *Disertación de Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas*. Original en ruso, MISIS, Moscú, 1975.
2. BAJTIAROV, R. A.: "La magnitud de la porosidad de contracción de la colada en dependencia de la situación de la aleación en el diagrama de fase". Original en ruso. *Revista Metalurgia y Combustible*, no. 4, 1962.
3. BAJTIAROV, R. A.: "Influencia de la composición de la aleación y la velocidad del enfriamiento en la distribución de la porosidad de contracción en las coladas". Original en ruso. *Revista Metalurgia y Combustible*, no. 5, 1962.
4. GULIAIEV, B. B.: *Procesos de fundición*. Original en ruso, Ed. Mashguiz, Moscú, 1960.
5. KUMANIN, I. B.: *Problemas de la teoría de los procesos de fundición*. Original en ruso, Ed. Mashinostroenie, Moscú, 1976.

## INVESTIGACIONES SOBRE LOS CRITERIOS DE SEMEJANZA HIDRODINAMICA APLICADOS AL TRANSPORTE HIDRAULICO

### RESUMEN

El estado actual de la teoría del hidrot transporte obliga con frecuencia a realizar experimentos para determinar los parámetros de trabajo de diferentes instalaciones industriales.

La realización de los ensayos en pequeñas instalaciones de laboratorio es más barata, consume menos tiempo y permite obtener resultados más precisos, pero su generalización a instalaciones industriales de mayor tamaño, o para hidromezclas con otra composición se dificulta debido a las limitaciones que para modelar estos fenómenos tienen los criterios de semejanza conocidos en la hidráulica de fluidos homogéneos.

En el presente trabajo se analizan algunos criterios de semejanza hidrodinámica con vista a su aplicación al hidrot transporte de minerales y concentrados. Se deducen dos nuevos parámetros adimensionales con perspectivas para su utilización como criterios de semejanza para generalizar resultados empíricos en el movimiento de líquidos heterogéneos y se establece una interrelación escalar para su modelación.

### ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТЕРИЕВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ПРИМЕНЯЕМЫХ В ГИДРАВЛИЧЕСКОМ ТРАНСПОРТЕ

#### Резюме

Существующее положение в теории гидротранспорта часто вызывает необходимость проведения экспериментов по определению рабочих параметров различных промышленных установок.

Реализация опытов в небольших лабораторных установках деше-  
вле, затрачивает меньше времени и позволяет получить более точ-  
ные результаты, однако их обобщение для использования в промыш-  
ленных установках больших размеров или для гидросмесей другого  
состава затрудняется ограничениями критериев гидродинамического  
подобия известных в гидравлике однородных жидкостей для модели-  
рования этих явлений.

В данной работе исследуются некоторые критерии гидродинамичес-  
кого подобия с целью их применения при гидротранспорте руд и  
концентратов. Выводятся два новых безразмерных параметра в ка-  
чества критерия подобия для обобщения эмпирических результатов  
при движении неоднородных жидкостей и устанавливается скалярная  
зависимость для их моделирования.

#### INVESTIGACIONES SOBRE LOS CRITERIOS DE SEMEJANZA HIDRODINAMICA APLICADOS AL TRANSPORTE HIDRAULICO

Ing. Rafael Pérez Barreto  
Candidato a Doctor en Ciencias Técnicas  
Profesor Titular del ISMMMOa

El estado actual de la teoría de traslación de partículas  
sólidas suspensas en flujos líquidos no permite resolver  
muchos problemas prácticos ingenieriles sin previas inves-  
tigaciones experimentales.

El desarrollo industrial exige el incremento de los volú-  
menes de materiales a transportar por tuberías y prolonga  
las distancias de tiro. Al mismo tiempo se amplía el  
campo de aplicación del hidrot transporte. Todo esto acre-

cienta el número de experimentos necesarios para proyectar  
diferentes instalaciones de transporte hidráulico.

Los intentos para establecer los parámetros del movimiento  
de las hidromezclas mediante la modelación en pequeñas  
instalaciones de laboratorio no siempre han sido satisfac-  
torios. Con el fin de obtener datos más fiables se tiende  
a realizar los trabajos experimentales en instalaciones  
de tamaño natural (industrial). Esto encarece los experi-  
mentos y provoca grandes pérdidas de tiempo en la elabo-  
ración de los proyectos.

Las investigaciones en instalaciones de pequeño tamaño son  
simples, baratas y aplican métodos y aparatos científico-  
experimentales más perfectos. Sin embargo, el análisis de  
los trabajos experimentales muestra que los resultados  
obtenidos en instalaciones de cualquier tamaño no son re-  
presentativos para el mismo sistema con otras dimensiones.  
La aplicación de la semejanza hidrodinámica en el movi-  
miento de líquidos heterogéneos es problemática. Hasta el  
momento no existe un criterio fiable de transición de los  
modelos de laboratorio del transporte hidráulico a las  
instalaciones industriales.

De tal forma surge la necesidad de establecer criterios  
fiables de semejanza hidrodinámica y determinar sus campos  
de aplicación dentro del transporte hidráulico.

En el presente trabajo se analizan algunos criterios de  
semejanza hidrodinámica con vista a su aplicación para  
determinar los parámetros del transporte hidráulico de mi-  
nerales y concentrados. Se deducen dos nuevos parámetros  
adimensionales que pueden ser utilizados como criterios  
de semejanza en la generalización de los resultados empí-  
ricos y, al mismo tiempo, se establece una interrelación  
escalar para modelar flujos con partículas sólidas en sus-  
pensión.

La generalización de los resultados de los ensayos en la mayoría de los trabajos experimentales difundidos en la bibliografía especializada se ha realizado mediante criterios que siempre han sido adimensionales, pero que no siempre corresponden a la esencia física de los fenómenos estudiados. Se pueden obtener criterios de semejanza físicamente fundamentados con la ayuda del análisis dimensional a partir de las ecuaciones diferenciales del movimiento de líquidos heterogéneos o de razonamientos teóricos.

En efecto, la velocidad y las pérdidas de altura en el movimiento de las hidromezclas dependen de las propiedades físico-mecánicas, así como de las dimensiones y rugosidad de los conductos.

En forma general la interrelación entre estas magnitudes se puede representar de la siguiente manera:

$$F(l; l_1; l_2; \Delta; U; i; \gamma_m; \rho; \mu; C) = 0 \quad (1)$$

donde:

$l; l_1; l_2$  - magnitudes lineales que caracterizan el conducto

$\Delta$  - rugosidad absoluta

$U$  - velocidad media del flujo

$i$  - pérdidas de altura

$\gamma_m$  - peso específico de la hidromezcla

$\rho$  - densidad de la hidromezcla

$\mu$  - viscosidad dinámica de la hidromezcla

$C$  - magnitud que depende del tamaño, peso y forma de las partículas sólidas y toma en consideración su composición mecánica.

La expresión (1) se diferencia de la ecuación para líquidos homogéneos por la presencia de la característica dimensional  $C$

Tomando como magnitudes dimensionales básicas, independientes de las otras,  $l$ ,  $U$  y  $\rho$  y aplicando el  $\pi$ -teorema para las pérdidas de altura- se obtiene la siguiente expresión:

$$i = F\left(\frac{l}{l_1}; \frac{l}{l_2}; \frac{\Delta}{l}; \frac{U^2}{g l}; \frac{U l \rho}{\nu}; C'\right) \quad (2)$$

donde:

$\frac{l}{l_1} = \lambda_1; \frac{l}{l_2} = \lambda_2$  - parámetros adimensionales que determinan la semejanza geométrica

$\frac{\Delta}{l} = \Delta'$  - rugosidad relativa

$U^2 g l = Fr$  - criterio de Froude

$g$  - aceleración gravitacional

$\frac{U l \rho}{\nu} = Re$  - criterio de Reynolds

$C'$  - parámetro adimensional que garantiza la semejanza física de las partículas sólidas: tamaño, peso, forma y dimensiones lineales.

De tal forma se tiene:

$$i = F\left(\lambda_1; \lambda_2; \Delta'; Fr; Re; C'\right) \quad (3)$$

Tomando como magnitud lineal característica el diámetro del conducto  $D$ , se obtiene:

$$\lambda_1 = 1 \text{ y } \lambda_2 = \frac{l}{D}$$

El criterio de semejanza  $\lambda$  puede tener significación para la hidrotransportación de materiales gruesos a grandes distancias cuando a lo largo de la tubería tiene lugar la variación de la forma y dimensiones de las partículas sólidas. Para hidromezclas con partículas finas en suspensión este factor desempeña el mismo papel que para líquidos homogéneos.

Entonces la expresión (3) toma la siguiente forma:

$$\dot{c} = F\left(\frac{\Delta}{D}; Fr; Re; C'\right) \quad (4)$$

La función 4 se puede descomponer en dos funciones:

$$\dot{c} = F_1\left(Re; \frac{\Delta}{D}; C'\right) + F_2\left(Fr; \frac{\Delta}{D}; C'\right) \quad (5)$$

En la primera función  $F_1$  están representadas las fuerzas de viscosidad, mientras que en la segunda  $F_2$ , las de gravedad. La ecuación (5) en forma general se puede aplicar muy rara vez, debido a la conocida contradicción entre los criterios  $Re$  y  $Fr$ . Sin embargo, el flujo siempre transcurre bajo la acción predominante de uno de los sistemas de fuerzas señalados: viscosos o gravitacionales. Entonces uno de los miembros de la parte derecha de la ecuación se puede despreciar.

Por ejemplo, en el movimiento de suspensiones homogéneas viscoso-plásticas, las fuerzas de viscosidad tienen una influencia determinante para obtener las pérdidas de altura. Por esto, para elaborar los datos experimentales es suficiente la función  $F_1$  de la ecuación (5). En el caso del movimiento turbulento de hidromezclas newtonianas, las fuerzas de viscosidad tienen significación secun-

daria y como criterio de semejanza se puede utilizar la expresión  $F_2$ .

$$\dot{c} = F_2\left(Fr; \frac{\Delta}{D}; C'\right) \quad (6)$$

Los términos adicionales  $Fr$  y  $\frac{\Delta}{D}$ , componentes de la expresión (6), son bien conocidos como criterios de semejanza hidrodinámica. Sin embargo, la aplicación incorrecta en ocasiones del primero de ellos:  $Fr$  el número de Froude, ha conducido a resultados erróneos. La magnitud  $Fr$  tiene la siguiente forma:

$$Fr = \frac{U^2}{gD}$$

donde:

- $U$  - velocidad media del flujo
- $g$  - aceleración de la gravedad
- $D$  - diámetro de la tubería.

A menudo, como magnitud característica, en lugar de la velocidad del flujo y del diámetro del conducto se utiliza el tamaño hidráulico  $W$  y el diámetro de las partículas sólidas  $d$ , entonces:

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

Esta expresión es conocida como número de Froude para las partículas sólidas y en la misma están bien representados el tamaño, peso y forma y dimensiones lineales de las partículas sólidas. No obstante, su aplicación ha conducido a resultados erróneos, entre otras causas por el desprecio de una magnitud tan característica como lo es el diámetro del conducto y por una segunda causa que analizaremos posteriormente en otro trabajo.



La rugosidad relativa  $\frac{\Delta}{D}$  también es un criterio de semejanza bien conocido. Es necesario tomar en cuenta que en el transporte hidráulico los tubos se alisan en el proceso de trabajo en poco tiempo. Por lo tanto, en la práctica, cuando se realizan ensayos en tubos lisos no hay necesidad de modelar la rugosidad.

El último de los términos  $C'$  que componen la ecuación  $F_2$  es desconocido. Este término debe reflejar la influencia del tamaño, el peso, la forma y las dimensiones lineales de las partículas sólidas. Los tres primeros factores están bien representados en el concepto único: tamaño hidráulico  $W$ , definido como la velocidad de caída libre de las partículas en el agua. No obstante, esta magnitud no constituye una característica completa de las partículas sólidas. Con el fin de reflejar la influencia de las dimensiones lineales se introduce el concepto de diámetro medio  $\bar{d}$ . Para el caso de composición heterogénea de las partículas sólidas la expresión del diámetro medio tendrá la siguiente forma:

$$\bar{d} = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_{m,k}^d}{100}$$

donde:

$\alpha$  - contenido de una clase dada en por ciento

$d_{m,k}$  - diámetro medio para cada clase

$n = 1, 2, 3, \dots, n$

Como característica capaz de reflejar la influencia de todos los factores anteriormente señalados se puede utilizar la magnitud  $wd$  con dimensiones  $\left[\frac{L^2}{T}\right] m^2/s$ . La selección de esta magnitud es arbitraria y su fundamentación experimental se obtuvo en (1).

Tomando como magnitudes características básicas  $\rho, \ell, U$  y sobre la base del  $\pi$  teorema se obtiene:

$$C' = \frac{UD}{wd} \quad (7)$$

De tal forma para las hidromezclas investigadas en tubos lisos la ecuación (1) toma la siguiente forma:

$$i = F\left(\frac{\rho}{D}; \frac{U^2}{gD}; \frac{UD}{wd}\right) \quad (8)$$

Cuando se modelan flujos turbulentos de líquidos heterogéneos utilizando la misma hidromezcla para el modelo que en el modelado es imposible aplicar simultáneamente los parámetros  $Fr$  y  $C'$  ya que en este caso se tiene:

cuando

$$\begin{aligned} Fr &= \text{idem} & \frac{\lambda}{U} &= \sqrt{\lambda} \\ C' &= \text{idem} & \frac{\lambda}{U} &= \lambda \end{aligned}$$

donde:

$\lambda; \lambda$  - coeficientes de escala para la velocidad y la dimensión lineal características, respectivamente.

Por lo tanto no se cumple la condición de semejanza.

$$Fr = \text{idem} \quad C' = \text{idem} \quad (9)$$

Esta situación es conocida en hidráulica para el caso de flujos turbulentos en la zona plana y de transición de las resistencias, así como en el caso de flujos laminares cuando se exige cumplir la condición

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

La condición (9) se puede cumplir cuando se modela con hidromezclas diferentes a las modeladas; en este caso es necesario mantener la relación:

$$\frac{W_n d_n}{W_m d_m} = \lambda = \frac{\lambda}{U} \frac{\lambda}{D} = \frac{\lambda}{D}^{1,5}$$

De tal forma se tienen dos términos adimensionales que pueden utilizarse como criterios de semejanza para modelar el movimiento de las hidromezclas. Uno de ellos, Fr, es bien conocido; el otro, C' está peor investigado. Es evidente que existen regiones donde es posible utilizar sólo uno de estos parámetros y regiones donde la aplicación de ambos simultáneamente es indispensable. La determinación de los límites de estas regiones se puede realizar sólo experimentalmente.

Se puede concluir que la modelación de flujos turbulentos utilizando la misma hidromezcla modelada es limitada.

Si cuando se resuelve la ecuación dimensional se sustituye una de las magnitudes tomadas como base por cualquiera de las contenidas en la expresión (1), como se muestra en la Tabla 1 no se obtienen nuevos criterios de semejanza y el parámetro C' no varía.

TABLA 1. Deducción de los parámetros adimensionales.

Magnitudes básicas	Parámetros					
	$l_1$	$l_2$	$\Delta$	U	$\rho_m$	$\rho_m$
$l U \rho_m$	$l_1/l$	$l_2/l$	$\Delta/l$	-	$\frac{U^2 \rho_m}{\rho_m}$	-
$l U \rho_m$	$l_1/l$	$l_2/l$	$\Delta/l$	-	$\frac{\rho_m g D}{U^2 \rho_m}$	$\frac{\rho_m g}{U^2 \rho_m}$
$l U \rho_m$	$l_1/l$	$l_2/l$	$\Delta/l$	-	$\frac{\rho_m \mu}{\rho_m}$	$\frac{\rho_m \mu}{U^2 \rho_m}$
$l U \rho_m$	$l_1/l$	$l_2/l$	$\Delta/l$	-	$\frac{\rho_m \mu}{\rho_m}$	$\frac{\rho_m \mu}{U^2 \rho_m}$

Si como magnitudes básicas se toman  $l$ ,  $i$  y  $\rho$  se obtiene una ecuación para la velocidad media en forma general, la cual para las hidromezclas con partículas finas en suspensión y para el transporte a cortas distancias toma la siguiente forma:

$$U = F\left(\frac{\Delta}{D}; \frac{D^2 \rho_m}{\mu}; \frac{i}{D \rho_m g}; \frac{i D^2}{\rho_m (wd)^2}\right) \quad (10)$$

En la expresión (10) se ha incluido el parámetro adimensional  $C''$  que contiene  $C = wd$ .

$$C'' = \frac{i D^2}{\rho_m (wd)^2}$$

Las dimensiones son las siguientes:

$$i \left[ \frac{N}{m^2} \right]; D [m]; \rho [kg/m^3]; w [m/s]; d [m]$$

y tomando en consideración que:

$$1 N = \frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2}$$

se obtiene:

$$\frac{i D^2}{\rho_m (wd)^2} \left[ \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2 \text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{kg/m}^3 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} \cdot \text{m}^2} \right]$$

Es decir,  $C''$  - adimensional.

La función (10) se puede descomponer en dos:

$$U = F_1\left(\frac{\Delta}{D}; \frac{D^2 \rho}{\mu}; \frac{i D^2}{\rho (wd)^2}\right) + F_2\left(\frac{\Delta}{D}; \frac{i}{\rho l g}; \frac{i D^2}{\rho (wd)^2}\right) \quad (11)$$

La primera función  $F_1$  está determinada por las fuerzas de viscosidad y la segunda,  $F_2$ , por las gravitacionales.

Para una rugosidad constante (tubos lisos) y para flujos newtonianos de hidromezclas con partículas sólidas en suspensión tendremos:

$$U = F\left(\frac{i}{D \rho g}; \frac{i D^2}{\rho (wd)^2}\right) \quad (12)$$

En los términos adimensionales de la ecuación (12) la magnitud  $\rho$  puede ser sustituida por la diferencia de densidades entre el líquido y el material sólido. De esta ecuación se obtiene la siguiente condición para modelar:

$$U = \text{idem}; \frac{i}{D \rho g} = \text{idem}; \frac{i D^2}{\rho (wd)^2} = \text{idem} \quad (13)$$

Como en el caso anterior cumplir estas condiciones simultáneamente, al modelar con el mismo líquido modelado es imposible, ya que entonces cuando:

$$\frac{i}{D \rho g} = \text{idem} \quad \lambda = \frac{\lambda}{D} \quad \lambda$$

y cuando

La condición (13) se puede cumplir cuando se modela con una hidromezcla diferente a la modelada, para lo cual debe cumplirse:

$$\frac{W_n d_n}{W_m d_m} = \frac{\lambda}{i} = \frac{\lambda}{D}^{1,5}$$

De la misma manera debe existir una región donde la aplicación de ambas sea posible.

De tal forma, con la ayuda de la teoría dimensional se obtiene un grupo de parámetros adimensionales de los cuales cuatro tienen un interés práctico para modelar flujos newtonianos de hidromezclas formadas con materiales sólidos, donde las fuerzas de viscosidad no tienen una significación predominante y de ellos parecen perspectivas los dos parámetros  $C'$  y  $C''$  obtenidos en el presente trabajo y que reflejan las propiedades físico-mecánicas de las hidromezclas.

En conclusión, se puede decir:

- a) La modelación de flujos con partículas sólidas en suspensión es realizable.
- b) La utilización como modelo de la hidromezcla modelada es limitada.
- c) Cuando se experimenta con hidromezcla diferente a las modeladas la modelación se puede efectuar aplicando las condiciones complementarias establecidas en el presente trabajo.

#### REFERENCIAS

1. PEREZ BARRETO, R.: "Investigación de los parámetros del transporte hidráulico de minerales y concentrados en flujos de alta densidad". Disertación para la obtención del grado científico de Candidato en Ciencias Técnicas. Krivoy Rog, 1970.

## VALVULA PARA REGULAR UNA CARACTERISTICA CRECIENTE ENTRE EL VOLUMEN Y EL FLUJO DE UN LIQUIDO

### RESUMEN

En este trabajo se expone una válvula hidráulica que permite regular una característica creciente entre el volumen de un líquido en un recipiente y su correspondiente flujo volumétrico de salida; se establece la importancia de la regulación de esta magnitud y los resultados experimentales obtenidos.

### КЛАПАН ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ОБЪЕМА ЖИДКОСТИ В СОСУДЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАСХОДА

### Резюме

В работе дано описание клапанного устройства, позволяющего регулировать объема жидкости заполняющей сосуд в зависимости от расхода. Приведены результаты экспериментального исследования устройств.

### VALVULA PARA REGULAR UNA CARACTERISTICA CRECIENTE ENTRE EL VOLUMEN Y EL FLUJO DE UN LIQUIDO

Ing. Manuel García Renté  
Asistente, Profesor del Dpto. de Física  
Matemática del ISMMMMoa

### INTRODUCCION

En este trabajo se establece teórica y prácticamente las posibilidades que brinda una válvula hidráulica para la