

Иван ИВАНОВ

Институт водных проблем БАН

Стелла ТАХРИЛОВА

Институт НИПРОРУДА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ПРИ НАПОРНОМ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ
НЕОДНОРОДНЫХ ПО ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОМУ СОСТАВУ МАТЕРИАЛОВ С БОЛЬШИМ
СОДЕРЖАНИЕМ МЕЛКИХ ЧАСТИЦ

Резюме. Анализируется вопрос определения гидравлических потерь при напорном транспортировании неоднородных по гранулометрическому составу материалов с большим содержанием мелких частиц. На основе опытных данных указанных выше авторов, а также на основе других данных даются зависимости для определения гидравлического уклона. При турбулентном режиме движения гидравлически однородных и вместе с этим неоднородных по гранулометрическому составу гидросмесей показано, что однородность суспензии формируется не из всех частиц. Предлагается критерий определения максимального размера частиц, образующих однородность смеси.

При гидравлическом транспорте все чаще встречается гидротранспортирование материалов с неоднородной гранулометрией и большим содержанием мелких фракций - различных видов концентратов, песков, хвостов обогатительных фабрик и др. Вопрос прогнозирования характерных скоростей и гидравлических потерь при транспортировании материалов решен не полностью. Определенные суждения и дополнительные данные для его решения окажутся практически полезными для специалистов, занимающихся теорией и практикой гидравлического транспорта.

Опыт показывает, что гидросмеси с неоднородной гранулометрией и большим содержанием мелких фракций могут рассматриваться как жидкости со свойствами, характерными одновременно для вязко-пластического тела и Ньютоновской жидкости. При большой концентрации твердого они проявляют характер Ньютоновской жидкости, а при меньших концентрациях отвечают линейной реологической зависимости. Эти гидросмеси имеют реограммы, подчиненные закону Бингама-Шведова, с определенной нелинейностью реограммы при меньших ускорениях и начальном сдвиге τ_0 , зависящем от вида гидросмеси и концентрации твердого. Это особенность реограмм позволяет в условиях движения с большими

ускорениями (для линейного участка реограммы), т.е. в турбулентном режиме движения, интерпретировать жидкость как Ньютоновскую, но с повышенной плотностью и вязкостью. При ламинарном режиме движения - движение с небольшими ускорениями, аномальные особенности жидкости оказывают существенное влияние на диссипацию и условия транспортирования, поэтому их необходимо учитывать.

В условиях движения с отчетливыми Ньютоновскими свойствами для оценки режима движения можно использовать обобщенное число Рейнольдса:

$$(1) \quad Re^* = \frac{VD}{\gamma_{CM} + \frac{\tau_0 Dg}{6V \rho_{CM}}},$$

где: D - диаметр трубопровода; V - средняя скорость движения; γ_{CM} - кинематический коэффициент вязкости гидросмеси; τ_0 - начальное напряжение сдвига; ρ_{CM} - плотность гидросмеси; g - ускорение свободного падения.

Возможны два режима движения - ламинарный и турбулентный. При определенном значении обобщенного числа Рейнольдса $Re^* = Re^*_{кр}$ ламинарный режим переходит в турбулентный. Особый интерес представляет турбулентный режим. В данном случае очерчиваются две области - область гидравлически однородных турбулентных движений и переходная область, расположенная между ламинарным режимом и режимом гидравлически однородных турбулентных движений. В переходной области диссипация потока изменяется незначительно с изменением скорости. Поток как бы изменяет свою структуру, переходя в гидравлически однородный поток. В этой области на диссипацию потока отражаются как свойства ламинарного потока, так и свойства турбулентного потока, причем первые преобладают в начале области, а вторые - в конце. В области гидравлически однородных турбулентных движений гидравлические потери резко нарастают с увеличением скорости. Кривая гидравлического уклона $J_{CM}(v)$ в логарифмических координатах практически параллельная кривой, построенной для воды $J_0(v)$. Зону однородных турбулентных движений можно определить по средней скорости в области $V \geq kV_{пр}$, где: $V_{пр}$ - скорость перехода от ламинарного к турбулентному режиму; $k \geq 1$ - коэффициент, зависящий от концентрации твердого.

Гидротранспорт этих материалов необходимо осуществлять со средней скоростью:

$$(2) \quad V_{пр} < V \leq kV_{пр}$$

Скорость $V_{пр}$ можно определить из (1) при $Re^* = Re^*_{кр}$, т.е.

$$(3) \quad v_{пр} = \frac{1}{2} \frac{\gamma_{CM} Re^*_{кр}}{D} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{2}{3} \frac{\tau_0 D^2 g}{\rho_{CM} \gamma_{CM}^2 Re^*_{кр}}} \right)$$

Исследования отдельных авторов показывают, что $Re^*_{кр}$ не имеет определенной величины и изменяется в границах от 10^3 до $2,5 \cdot 10^3$. Рассматривая закономерности движения этих гидросмесей как гидравлически однородных с повышенной плотностью и вязкостью, по аналогии с движением воды для значения $Re^*_{кр}$ можно принять $2,32 \cdot 10^3$ (по данным Дюрана $Re^*_{кр} = 2 \cdot 10^3$).

На практике только некоторые гидросмеси подчиняются закону Бингама. Это

смеси с очень мелкими частицами. Смеси с неоднородной гранулометрией и частицами диаметром более чем 0,03-0,04 мм при движении под действием внешнего усилия, значительно превосходящего усилие для преодоления начального напряжения сдвига, достаточно точно могут быть проанализированы по закону не-Ньютоновской бингамовой жидкости, причем учитывается влияние особенностей гидросмеси, связанных с наличием более крупных фракций, как на скорость осаждения (критическая скорость), так и на гидравлические потери.

Разнофракционные гидросмеси с большим содержанием мелкозернистых частиц в ламинарном режиме движения проявляют тенденцию к осаждению более крупных частиц. В данном случае вопрос о так называемой критической скорости является существенным. При транспортировании в условиях гидравлической однородности вопрос определения гидравлического уклона сводится к определению коэффициента гидравлических потерь $\lambda_{см}$, а при $V \geq kV_{пр}$ - к правильному определению плотности гидросмеси $\rho_{см}$. В первом случае гидравлические потери определяются при помощи зависимости:

$$(4) \quad \frac{\Delta H_{заг.}}{L} = J_{см} = \frac{\lambda_{см}}{D} \frac{V^2}{2g}, \text{ м.ст. пульпы}$$

а во втором - из условия гидравлической однородности при помощи зависимости:

$$(5) \quad \frac{\Delta H_{заг.}}{L} = J_{см} = \frac{\lambda_0}{D} \frac{V^2}{2g} \frac{\rho_{см}}{\rho_0} = J_0 \frac{\rho_{см}}{\rho_0}, \text{ м.в.ст.,}$$

где: λ_0 - коэффициент гидравлических потерь чистой воды; ρ_0 - плотность воды.

При ламинарном режиме движения коэффициент $\lambda_{см}$ в трубопроводах определяется по формуле:

$$(6) \quad \lambda_{см} = \frac{64}{Re^*}.$$

При турбулентном режиме движения коэффициент $\lambda_{см}$ определяется:

а) по известным формулам Прандтля и Блазиуса при движении в гладких трубах:

$$(7) \quad \lambda_{см} = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}; \quad Re^*_{кр} \leq Re = \frac{VD}{\gamma} < 2.10^4$$

$$(8) \quad \frac{1}{\sqrt{\lambda_{см}}} = 2 \log Re \sqrt{\lambda_{см}} - 0,8; \quad 2.10^4 \leq Re = \frac{VD}{\gamma} \leq 3,24.10^6$$

б) по формуле Колбрука-Уайта при движении в шероховатых трубах. (9).

Справедливость (4) при (7), (8) и (9), когда речь идет от транспортировании материалов с однородной гранулометрией и большим количеством мелких фракций, неочевидна. При использовании (5) необходимо знать плотность гидравлически однородной смеси. Если все частицы формируют гидравлически однородную смесь, то плотность потока определяется с помощью зависимости:

$$(10) \quad \rho_{\text{см}} = C \cdot (\rho_T - \rho_0) + \rho_0 ;$$

где: C - объемная концентрация гидросмеси.

Для многокомпонентных гидросмесей логичен вопрос о возможности критического использования (4) и (5).

Применение (4) при $\lambda_{\text{см}}$ по (6), (7), (8) и (9) требует наличия условия гидравлической однородности гидросмеси. Использование формулы (5) при транспортировании материалов с неоднородной гранулометрией и большим содержанием мелких частиц, несмотря на то, что она оказывается следствием гидравлической однородности суспензии, требует обоснования. Для этой цели воспользуемся опытными данными, приведенными на рис.1 и рис.2. На рис.1а даны кривые $J(V)$ при транспортировании речного песка с плотностью $\rho_T = 2,4 \text{ т/м}^3$ и гранулометрией, показанной на рис.1б. По данным IZI на рис.2а в логарифмических координатах указан гидравлический уклон при транспортировании железного концентрата плотностью $\rho_T = 4,9 \text{ т/м}^3$ и гранулометрией, представленной на рис.2б. Из рис.2а видно, что при $V \geq V_H = kV_{\text{пр}}$ кривые $J_{\text{см}}(V)$ практически параллельны кривой, справедливой чистой воды $J_0(V)$. Следовательно, на участке $V \geq kV_{\text{пр}}$ гидросмеси можно рассматривать как гидравлически однородные. На этом участке, исходя из условия гидравлической однородности, для определения $J_{\text{см}}(V)$ должна быть справедлива зависимость (5).

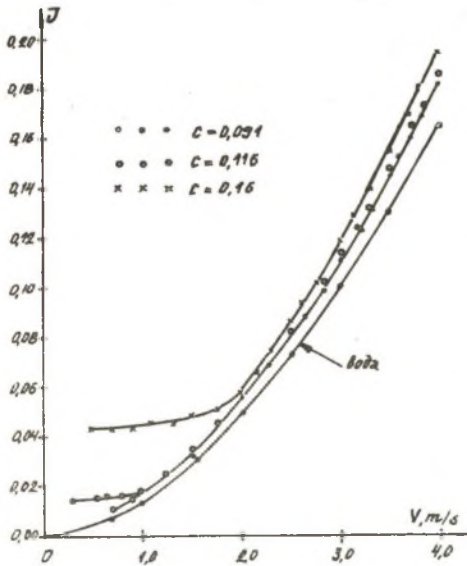


Рис.1а Зависимость гидравлического уклона от скорости движения водогрунтовой смеси в трубопроводе $D = 80 \text{ мм}$

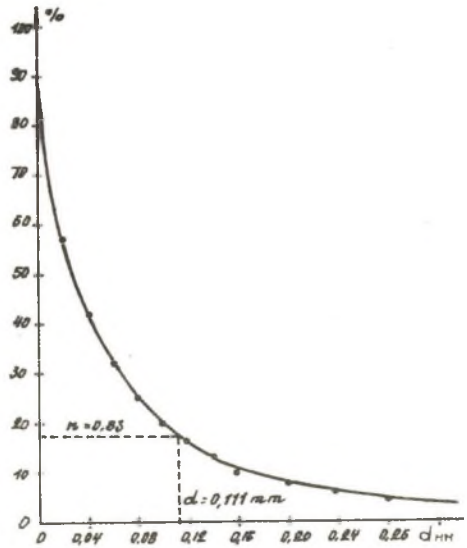


Рис.1б Кривая гранулометрического состава песка из долины р.Марица - $\rho_T = 2,4 \text{ т/м}^3$

В таблице 1 для некоторых характерных скоростей даны опытные (взятые с кривых рис.1б и рис.2б) и вычисленные по (5) значения гидравлического уклона.

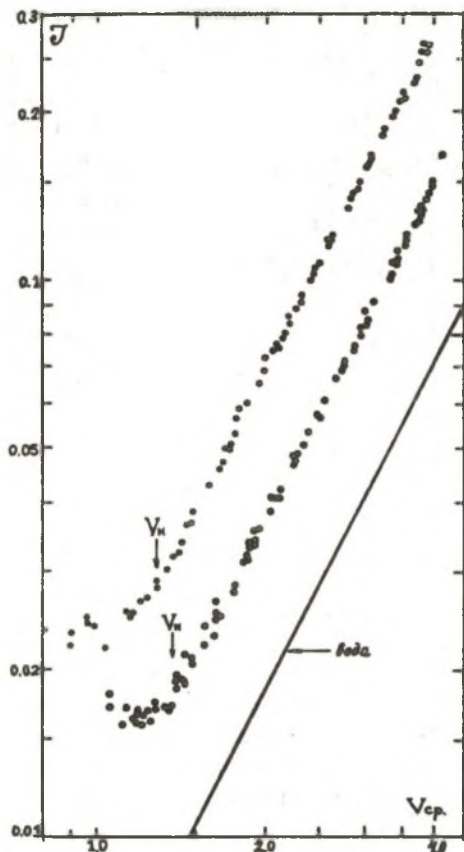


Рис. 2а Изменение гидравлического уклона с изменением скорости при гидравлическом транспортировании железного концентрата 121.
 Объемная концентрация $C = 0,32$, $\rho_T = 4,9 \text{ т/м}^3$,
 $d_{50} = 0,04 \text{ мм}$
 ... - $\Phi = 150 \text{ мм}$
 ooo - $\Phi = 200 \text{ мм}$

Рис. 26 Гранулометрический состав железного концентрата 121
 $\rho_T = 4,9 \text{ т/м}^3$,
 $d_{50} = 0,04 \text{ мм}$, $d = 0,078 \text{ мм}$,
 $n = 0,881$

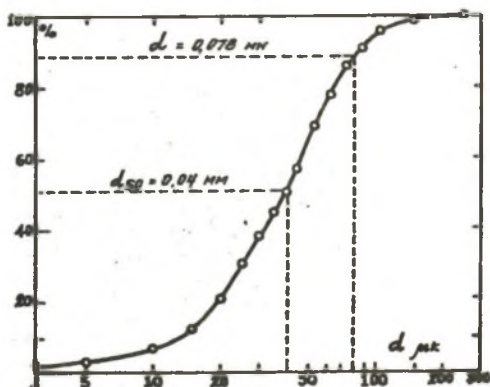


Таблица 1

V, м/сек	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	Замечание	
Мелкий песок I11 C=0,091	$J_{опыт}$	0,031	0,054	0,0815	0,11	0,144	0,181	-	$\rho_T=2,4 \text{ т/м}^3$ $\Phi=80 \text{ мм}$ $n=0,83$ $d=0,111 \text{ мм}$ $V_{пр}=0,767$ м/сек по(3)
	$J_{см}$ по(5)	0,0316	0,054	0,0824	0,1127	0,1465	0,185	-	
	$J_{см}$ по(12)	0,031	0,0535	0,081	0,1106	0,144	0,1812	-	
C=0,16	$J_{опыт}$	0,048	0,057	0,086	0,118	0,1535	0,1940	-	$\rho_T=2,4 \text{ т/м}^3$ $\Phi = 80 \text{ мм}$ $n = 0,83$ $V_{пр}=1,719$ м/сек по(3)
	$J_{см}$ по(5)	0,0343	0,0587	0,0895	0,1224	0,159	0,203	-	
	$J_{см}$ по(12)	0,0332	0,0569	0,0865	0,1186	0,154	0,1945	-	
Железный кон- центрат I21 C=0,32	$J_{опыт}$	-	0,0386	0,0599	0,0854	0,1155	0,1499	0,1889	$\rho_T=4,9 \text{ т/м}^3$ $\Phi = 200 \text{ мм}$ $n = 0,881$ $d=0,078 \text{ мм}$
	$J_{см}$ по(5)	-	0,04136	0,0641	0,091	0,1236	0,1605	0,202	
	$J_{см}$ по(12)	-	0,03864	0,05984	0,08536	0,115489	0,1499	0,18898	

Из таблицы видно, что вычисленные значения гидравлического уклона больше опытных, что не соответствует условию гидравлической однородности. Возникает вопрос, с чем связано это противоречие. Если исследованные гидросмеси однородны по гранулометрии и плотности и отвечают требованиям гидравлической однородности, то при $J_0(V)$, определенным опытным путем, такого противоречия не было бы. Для неоднородных смесей с большим процентом мелких частиц, какими являются рассмотренные выше, понятие "гидравлическая однородность" имеет то же самое содержание - равномерное распределение частиц по сечению, - но в условиях так называемой однородной несущей жидкости плотностью и вязкостью больше чем у чистой воды. Некоторые фракции этих гидросмесей при определенной средней скорости транспортирования всегда находятся в состоянии гидравлической однородности и для транспортирования крупных по размеру фракций образуют с водой так называемую несущую жидкость. Когда частицы, формирующие гидравлически однородную несущую среду, преобладают в гидросмеси, то они образуют гидравлически однородный поток, способный переносить определенный процент более крупных фракций, которые не оказывают существенное воздействие на структуру распределения частиц и на величину гидравлических потерь. Это очевидное предположение показывает, что плотность гидравлической однородности гидросмеси не обуславливается всеми частицами, а только теми, которые формируют гидравлическую однородность. Остальные частицы с размером больше тех, которые образуют гидравлическую однородность, плавают в гомогенной смеси, не оказывая воздействия на гидравлический уклон

смеси вследствие их низкого содержания в ней. Следовательно, с гидравлической точки зрения гидросмесь должна рассматриваться как гидравлически однородная с объемной концентрацией $C_0 = nC$, где n - часть частиц в смеси, образующая ее гидравлическую однородность. Плотность гомогенной смеси, в которой движутся крупные частицы, будет меньше плотности всей смеси, т.е.

$$(11) \quad \rho_{см.о} = C_0(\rho_T - \rho_0) + \rho_0 = nC(\rho_T - \rho_0) + \rho_0$$

В данном случае из условия гидравлической однородности для определения гидравлического уклона используется зависимость (12):

$$(12) \quad J_{см} = J_0 \frac{\rho_{см.о}}{\rho_0}$$

Чтобы использовать (12) необходимо знать процентное содержание частиц, формирующих гидравлическую однородность смеси, т.е. число n . Число n можно определить по гранулометрической кривой при условии, что верхняя граница размера частиц в однородной суспензии известна. Максимальный размер частиц, участвующих в формировании гидравлической однородности указанной гидросмеси, углубленно проанализирован авторами в [11], и для его определения рекомендуется формула (13):

$$(13) \quad d = 0,124 \sqrt[3]{\frac{1}{\rho_T - \rho_0}}$$

где: d - условный максимальный диаметр частиц, мм; ρ_T и ρ_0 - плотность твердого и воды, т/м³.

В таблице 1 указаны вычисленные значения гидравлического уклона $J_{см}(V)$ по (12) при $\rho_{см.о}$ по (11), где n определяется гранулометрическими кривыми по максимальному диаметру частиц, образующих гидравлическую однородность смеси, вычисленному по (13). Из данных видно, что опытные значения гидравлического уклона и вычисленные по (12) совпадают.

Используя опытные данные из [13], касающиеся определения гидравлического уклона при транспортировании различных видов концентратов и хвостов в трубопроводах Φ 103, 206 и 310 мм, приходим к тому же результату. Это показывает, что выявлена определенная закономерность, которую нужно учитывать при определении гидравлического уклона при транспортировании однородных гидросмесей с большим содержанием мелких частиц.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Иванов И. Методика за изчисляване на хидравлически наклон и критична скорост при напорно хидравлично транспортиране на концентрати, научен архив, Институт по водни проблеми при БАН, С., 1985-1986
2. Hayashi H., T.Sampe, S.Oda, S.Ohtomo. Dome experimental studies on iron concentrate slurry transport in Pilot Plant. Hydraultransport 7, Sendai, Japan, 1980
3. Карасик В.М., И.А.Асауоленко, Ю.К.Витожкин. Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов, "Наукова Думка", Киев, 1976

Recenzent: Prof. dr hab, inż. Ryszard GRZYBOS

OKREŚLENIE HYDRAULICZNYCH STRAT PODCZAS CIŚNIENIOWEGO TRANSPORTU
NIEJEDNORODNYCH WEDŁUG SKŁADU GRANULOMETRYCZNEGO
MATERIAŁÓW Z DUŻĄ ZAWARTOŚCIĄ MAŁYCH CZĄSTEK

S t r e s z c z e n i e

W artykule analizuje się zagadnienie określenia strat hydraulicznych w rurociągach podczas transportu materiałów niejednorodnych z dużą domieszką drobnych frakcji.

Wskazano, że te mieszaniny hydrauliczne można rozpatrywać jako cząstki nieneutonowe, a w warunkach ruchu turbolentnego jako newtonowe, lecz z podwyższoną lepkością i gęstością w stosunku do lepkości i gęstości wody.

Otrzymano dane doświadczalne o wartości i charakterze zmiany oporów hydraulicznych podczas transportu hydraulicznego drobnoziarnistego piasku rurociągiem o średnicy 80 mm.

Dane przytoczono w postaci wykresu $I_{cm} = f(v)$ dla stałej wartości objętościowej konsystencji mieszaniny hydraulicznej - $C = 0,091, 0,116$ i $0,16$. Charakter krzywych wskazuje, że mieszanina hydrauliczna o dużej zawartości drobnych cząstek tworzy jednorodną ciecz z dużą lepkością i gęstością w stosunku do wody.

Wskazano, że jednorodną ciecz tworzą nie wszystkie cząstki, a tylko te, które posiadają wymiary mniejsze od określonej średnicy.

Podaje się wzór dla obliczenia maksymalnej średnicy cząstek tworzących hydrauliczną jednorodną suspensję.

Proponuje się sposób określenia strat hydraulicznych w rurociągach podczas transportu materiałów niejednorodnych z dużą domieszką drobnych frakcji. Dla uzasadnienia sposobu wykorzystuje się dane doświadczalne w tym takie dane otrzymane innymi badaniami.

DETERMINATION OF HYDRAULIC LOSS IN PRESSURE TRANSPORTATION
OF SIZED MATERIALS WITH HIGH PORTION OF FINE PARTICLES

S u m m a r y

In this paper are analyzed the problems of hydraulic loss determination for pipelines, transporting heterogenous materials with high fine particles content.

It is shown that such hydromixtures can be considered non-Newtonion, but having a brigher viscosity and density than weter.

The test results obtained show the range and charecter of the hydraulic loss variation in case of hondling fine sand in a pipeline with 80 mm diameter and solids volume concentration $c = 0,031, 0,116$ and $0,16$.

Data is plotted in the form of the $I_{hm} = (v)$ curves. The curve carac-ter snow thted the hydromixtures with high proportion of fine fractions

form homogenous liquids of a higher viscosity and density than water. It is shown, that homogenous liquids can be formed only by particles, having a size, smaller than or equal to a certain diameter, for the determination of which an equation is given.

A method is proposed for the assessment of the hydraulic loss in the hydraulic transportation of heterogeneous materials with high fine fraction content. The method is based on test results, including also other researchers evidence .