



УДК 622.648.24:621.643.29:539.62

Семененко Е.В., д.т.н., с.н.с., Татарко Л.Г.

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины,

г. Днепропетровск

Украинский государственный химико-технологический университет,

г. Днепропетровск,

ОБОБЩЕННЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ ЧАСТИЦ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПРИ ТЕЧЕНИИ ГИДРОСМЕСИ ПО ТРУБАМ ИЗ ПОЛИЭТИЛЕНА

Напорный гидротранспорт широко используется в горной промышленности для перемещения материалов различной крупности и плотности, а также смесей этих материалов. Наиболее перспективными тенденциями модернизации гидротранспортных систем горных предприятий являются переход к транспортированию пульп с концентрацией пасты и применение полиэтиленовых труб (ПЭ) вместо стальных или вместе со стальными трубами. Оба метода направлены на снижение энергоемкости процесса транспортирования и удельного расхода технической воды. Однако использование ПЭ труб позволяет проводить модернизацию с меньшими капитальными затратами, без замены центробежных насосов на поршневые, и не вызывает угрозы закупорки магистрали. Можно говорить, что переход к пастообразным пульпам более эффективен для гидротранспортных установок с незначительной длиной магистрали, а применение ПЭ труб – наиболее эффективно для магистралей значительной протяженности. Это объясняется тем, что мала длина магистрали при переходе на пастообразные пульпы не требует значительного повышения мощности насосного оборудования, меньше капитальные затраты на замену трубопровода, выше вероятность повторного



запуска после аварийной остановки, в то время как эффект снижения гидравлического сопротивления магистрали проявляется тем значительней, чем большая ее часть выполнена из ПЭ труб. Успешное внедрение обоих методов требует обоснованных методов расчетов параметров гидротранспорта. Однако если для пастообразных пульп это должны быть принципиально новые теоретические результаты, так как реология суспензий с такими концентрация существенно другая, то для ПЭ труб можно адаптировать известные методики, разработанные для гидротранспорта пульп низкой концентрации по стальным трубам. На территории бывшего СССР было разработано около 20 методик расчета гидравлических уклонов и критических скоростей гидротранспортирования полидисперсных материалов. Из них наибольшее распространение и доверие расчетчиков получили методики А.Е. Смолдырева и С.И. Криля.

Особенностью методики А.Е. Смолдырева является учет вклада в критическую скорость и гидравлический уклон каждой из рассматриваемых фракций частиц отдельным слагаемым. Это позволяет для большинства транспортируемых материалов легко адаптировать расчетные формулы с использованием степенного закона для зависимости коэффициента гидравлического сопротивления трения от числа Рейнольдса:

$$Fr_{kp} = \sqrt[3]{qc' \sqrt[3]{aS_2\psi} + \sqrt{qc''} \sqrt{ofaS_3}}, \quad i = i_0(1 + aS_1) + c_1aS_2 \frac{\psi}{Fr} + ofaS_3, \quad Fr_{kp} = \frac{V_{kp}}{\sqrt{gD}}, \quad i_0 = 0,5\lambda Fr^2, \quad \lambda = \frac{m}{Re^n},$$

$$a = \frac{Ar(1 - S_1)}{1 + ArS_1}, \quad Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}, \quad q = \frac{0,3864}{\lambda 1g^2(0,1Re)}, \quad Re = \sqrt{GmFr}, \quad Gm = \frac{gD^3}{v^2}, \quad \psi = \frac{w}{\sqrt{gd}},$$

$$Ar = \rho - 1,$$

где V_{kp} – критическая скорость гидротранспортирования; i – гидравлический уклон; c', c'', c_1 – эмпирические константы; S_1, S_2, S_3 – концентрация тонких, мелких и кусковых частиц [3]; f – коэффициент трения кусковых частиц о дно трубы; λ – коэффициент гидравлического сопротивления; v – скорость гидросмеси; D –



диаметр трубопровода; w , d – гидравлическая крупность и диаметр мелких частиц; ρ – относительная плотность транспортируемого материала; σ – эмпирический коэффициент, учитывающий изменение коэффициента трения кусковых частиц о дно трубы (табл. 1); ν – кинематический коэффициент вязкости воды; q – параметр, учитывающий изменение зависимости λ от критерия Рейнольдса в ПЭ трубах по сравнению со стальными (рис. 1, табл. 2).

Таблица 1

Результаты экспериментов по изучению интервалов изменения σ

Материал		Интервал значений	
название	поверхность	от	до
Железорудный концентрат	сухая	0,788	0,979
	мокрая	0,671	0,591
Кварцевый песок	сухая	0,784	0,804
	мокрая	0,648	0,754
Гравийный отсев	сухая	0,819	0,952
	мокрая	0,742	0,824

Таблица 2

Значения коэффициентов, используемых для гидравлического расчета полимерных труб, по различным методикам

№	Методика	m	n	\bar{q}	q_{min}	q_{max}
1	СНиП 2.04.02-85	0,226	0,271	1.260	1.127	1.619
2	ISO TR 10501	0,240	0,273	1.218	1.110	1.508

3	ISO TR 10501	0,200	0,171	1.189	1.122	1.400
4	ИГТМ НАНУ	0,250	0,316	1.191	1.065	1.530

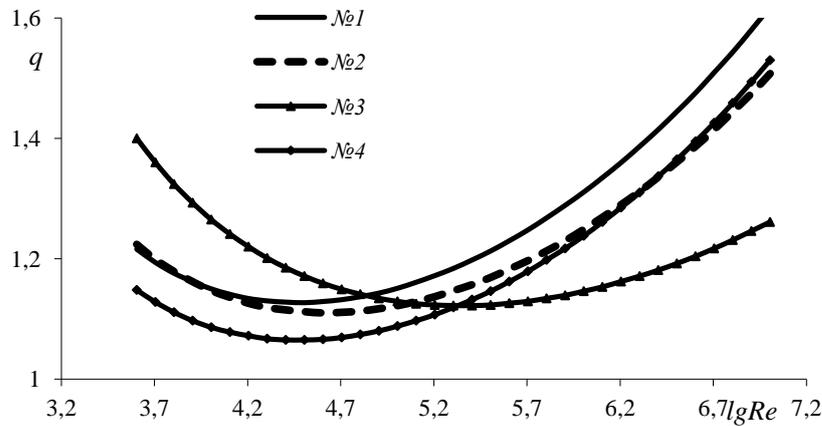


Рис. 1 – Зависимость величины q от числа Рейнольдса для различных методик

Для стальных труб величина коэффициента f определялась экспериментально, поэтому и для ПЭ труб были проведены аналогичные исследования, позволившие определить интервалы изменения величины σ . Величина коэффициента f в ходе экспериментов определялась при протаскивании сегмента стальной и ПЭ трубы по слою твердых частиц.

Особенностью методики С.И. Крыля заключается в необходимости определения обобщенного коэффициента трения не только для кусковых фракций, а для всех фракций полидисперсного материала. Это обусловлено, тем, что в данной методике критическая скорость гидротранспортирования определяется не по аналитической формуле, а из численного решения нелинейного уравнения

$$\frac{\lambda_{kp} V_{kp}^2}{2gD\omega_{kp}^2} = 1.96\sigma_* \frac{\rho - 1}{\Delta_0} S_m h_{kp} k_{85}, \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{n}{Re_{kp}^m}, \quad \lambda_{kp} = n \left(\frac{\omega_{kp}}{Re_{kp}} \right)^m \left(\frac{\psi_0}{(1-a_{kp})\Delta_0} \right)^m, \quad \omega_{kp} = \frac{1+1.326\sqrt{\lambda}}{1+1.326\sqrt{\lambda}\beta_{kp}}, \quad \beta_{kp} = 1 + a_{kp} + \frac{\varphi_0}{\sqrt{Gm}} Re_{kp},$$



где s_m – максимальная концентрация пульпы, д. ед.; Δ_0 – относительная плотность гидросмеси у верхней стенки трубы; ψ_0 – относительная вязкость суспензии; $a_{кр}$, φ_0 – коэффициенты, учитывающие свойства твердых частиц; k_{85} – обобщенный коэффициент трения о трубу с водой твердых частиц с диаметром, соответствующим объемной доли 85 %; σ_* – коэффициент снижения трения частиц за счет наличия глинистых фракций; $h_{кр}$ – относительная толщина слоя заиления.

Уравнение (1) уже частично адаптировано для гидравлического расчета ПЭ труб, поскольку описания зависимости λ от критерия Рейнольдса используется степенной закон, однако величина k_{85} определена только для стальных труб. Такие исследования для ПЭ труб были проведены в ИГТМ НАН Украины для железорудного концентрата на специально разработанном стенде (рис. 2). Результаты экспериментов указывают на существование двух значений исследуемого коэффициента: первое составляет $0,9 \pm 0,05$, с коэффициентом вариации 5,8 %, второе – $1,27 \pm 0,15$, с коэффициентом вариации 11,49 %. Меньшее значение соответствует моменту, когда частицы верхнего слоя начинают скольжение по частицам нижних слоев. Большее значение определялось моментом, когда начинали скольжения частицы, непосредственно соприкасающиеся со стенкой трубы. Однако оба эти значения оказались больше значения k_{85} , полученного для стальных труб, которое по данным С.И. Крыля не превосходит 0,6.

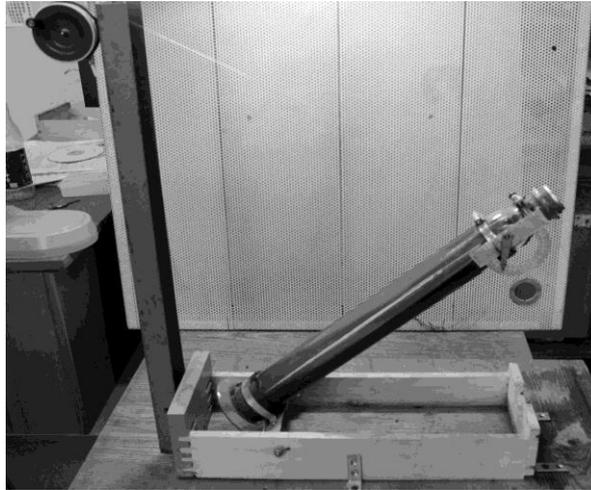


Рис. 2 – Экспериментальный стенд для определения величины k_{85}

Из формул А.Е. Смолдырева и рис. 1 видно, что величина критической скорости для ПЭ труб больше чем соответствующая величина в стальных трубах такого же диаметра. Полученные в ходе экспериментов значения k_{85} , подтверждают эту тенденцию. Так левая часть уравнения (1) в рассматриваемом диапазоне является монотонно возрастающей функцией, а правая часть, прямо пропорциональная величине k_{85} , относительно критической скорости – константа. Таким образом, ордината точки пересечения вогнутой кривой с прямой параллельной оси абсцисс определяется высотой расположения этой прямой, то есть величиной k_{85} . Чем больше значение k_{85} , тем выше критическая скорость, определяемая по формуле (1). Таким обе методики расчета параметров гидротранспорта согласуются между собой при адаптации их к условиям гидротранспортирования полидисперсных материалов по ПЭ трубам.