

## Список литературы

1. Haldenwang, R. The flow of Non-Newtonian fluids in open channels / R. Haldenwang. – Cape Town: Cape Technikon, 2003. – 384 p.
2. Смолдырев, А.Е. Трубопроводный транспорт концентрированных гидросмесей / А.Е. Смолдырев, Ю.К. Сафонов. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
3. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости / У.Л. Уилкинсон – М.: Мир, 1964. – 155 с.
4. Яхно, О.М. Основы реологии полимеров / О.М. Яхно, В.Ф. Дубовицкий. – К.: Вища шк., 1976. – 188 с.
5. Круть, О.А. Водовугільне паливо / О.А. Круть. – К.: Наук. думка, 2002. – 172 с.
6. Киричко, С.Н. Расчет параметров гидротранспорта высококонцентрированных гидросмесей в условиях предприятий Кривбасса / С.Н. Киричко // Геотехн. механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Д., 2012. – Вып. 103. – С. 101 – 106.
7. Александров, В.И. Методы снижения энергозатрат при гидравлическом транспортировании смесей высокой концентрации / В.И. Александров. – С.Пб.: СПГТИ (ТУ), 2000. – 117 с.

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Четвериком М.С.*

УДК 622.648[621.643.29:678.742.2].001.24

*А.И. Нестеренко, д-р физ.-мат. наук, Л.Г. Татарко  
(Украина, г. Днепропетровск, ДГХТУ МОНС Украины)*

*Е.В. Семененко, д-р техн. наук*

*(Украина, г. Днепропетровск, ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины)*

## ОСОБЕННОСТИ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Трубопроводы из полиэтилена высокой плотности ПЭ 100 за последние десять лет хорошо зарекомендовали себя в водопроводных и газовых сетях, где они составили серьезную конкуренцию стальным трубопроводам. Это послужило предпосылкой для применения этих труб в системах горного производства, на открытых горных работах и в пределах промплощадки горно-обогатительных комбинатов, как для транспортировки воды, так и для транспортировки гидросмесей [1 – 5]. Известные методики расчета гидравлического уклона при течении воды в полиэтиленовых трубопроводах (ISO TR 10501, СНиП 2.04.02-84, СП 40-102-2000) позволяют обоснованно рассчитать диаметр и другие параметры магистрали [6 – 8]. Однако для систем, транспортирующих гидросмеси, подобные методики не утверждены, кроме того, до недавнего времени известны примеры использования труб из полиэтилена для замены части магистрали гидротранспортных комплексов, что не требует обоснования величины диаметра трубопровода [3 – 5, 9]. Применение такого вида труб вместо стальных для всей магистрали систем водоснабжения или гидротранспорта сдерживается отсутствием научно обоснованных методов расчета, учитывающих меньший по сравнению с стальными трубами запас по прочности.

Целью статьи является разработка методики проектировочного расчета параметров трубопроводных систем горного предприятия, подающих воду и гидросмеси по магистралям из полиэтиленовых труб.

Проектировочный расчет проводится с целью определения величины диаметра трубопровода и показателей назначения насосов (суммарного напора и мощности насосов), необходимых для обеспечения регламентированных параметров и режимов работы. При проектировочном расчете системы водоснабжения накладываются ограничения на скорость и давление потока, которые не должны превышать допустимых значений [7, 8, 10]:

$$V \leq [V], \quad P \leq [P], \quad (1)$$

где  $V$  – скорость течения жидкости по трубопроводу;  $[V]$  – максимально допустимая скорость потока;  $P$  – давление потока в трубопроводе;  $[P]$  – максимально допустимое давление потока.

При расчете гидротранспортного комплекса к ограничениям (1) добавляется условие реализации сверхкритического режима течения, которое для фактического диаметра трубопровода является критическим значением [2, 11 – 13], т.е.

$$D \leq D_{кр}, \quad (2)$$

где  $D$  – внутренний диаметр трубопровода;  $D_{кр}$  – критический диаметр трубопровода, обусловленный требованием сверхкритического режима течения [11 – 13].

Для наружных водопроводных сетей скорость потока согласно СНиП 2.04.02-84 с целью предотвращения гидравлических ударов значительной силы ограничивается 2 или 3 м/с [7, 8], а максимально допустимое давление в трубопроводе регламентируется техническими условиями и государственными стандартами на трубы из полимерных материалов [10], так, например, для ПЭ100 в зависимости от значения  $SDR$  оно изменяется от 0,6 до 1,6 МПа (таблица). Для трубопроводов гидротранспортных комплексов, которые традиционно монтировались из стальных труб, максимальное ограничение скорости не регламентируется, а давление, которое способны выдержать стальные трубы со значительным запасом превосходило рабочее давление потока в них. В сложившихся условиях, когда магистрали вновь строящихся и модернизируемых гидротранспортных комплексов монтируются из полимерных материалов, необходимо ограничивать давление потока в них в соответствии с техническими условиями и государственными стандартами.

При проектировочном расчете системы водоснабжения первое выражение (1) с помощью известной формулы, связывающей скорость, расход и диаметр трубопровода, легко преобразуется в следующее неравенство для диаметра трубы (рис. 1):

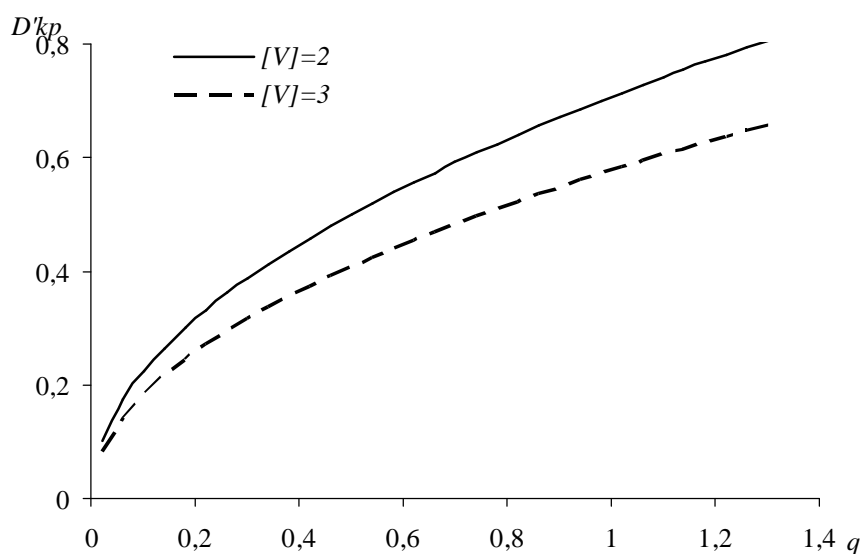


Рис. 1. Зависимость величины  $D'_{кр}$  от уточненного расхода жидкости при различных значениях максимально допустимой скорости потока

$$D'_{кр} \leq D; \quad (3)$$

$$D'_{кр} = \sqrt{\frac{q}{[V]}}; \quad q = \frac{4}{\pi} Q,$$

где  $D'_{кр}$  – критический диаметр трубопровода, обусловленный максимально допустимой скоростью потока;  $q$  – уточненный расход жидкости;  $Q$  – требуемый расход жидкости.

Максимально допустимое давление потока для трубопроводов из ПЭ100, МПа

$SDR = 11$	$SDR = 13.6$	$SDR = 17$	$SDR = 26$
1,60	1,25	1,00	0,60

При проектировочном расчете, когда точный профиль трассы еще неизвестен, предполагается, что максимальное давление в трубопроводе реализуется в напорном патрубке насоса и в соответствии с известными методиками расчета гидравлического уклона при течении воды в полиэтиленовых трубопроводах (ISO TR 10501, СНиП 2.04.02-84, СП 40-102-2000) [3 – 7] можно записать так:

$$H = i_0 k_Z L \pm \Delta Z + H_0; \quad i_0 = m \frac{V^{2-n}}{D^{1+n}}, \quad (4)$$

где  $i_0$  – гидравлический уклон при течении жидкости по трубопроводу [2, 9, 14, 15];  $m, n$  – константы закона сопротивления для полимерных труб, например, для полиэтилена  $m = 0,000543$  и  $n = 0,25$  [6 – 7];  $H$  – требуемый напор насоса;  $k_Z$  – коэффициент, учитывающий местные гидравлические сопротивления [9, 14, 15];  $L$  – длина трубопровода;  $\Delta Z$  – перепад геодезических высот начала и конца трубопровода;  $H_0$  – остаточный напор.

Зависимости (4) посредством известной формулы, связывающей скорость, расход и диаметр трубопровода, легко преобразуются в выражение

$$H = \frac{k_D}{D^{5-n}} + k_0, \quad (5)$$

которое после подстановки во второе из неравенств (1) позволяет получить второе ограничение для диаметра трубопровода:

$$D_{kp}'' \leq D; \quad D_{kp}'' = Wq^M,$$

$$W = \left( \frac{mk_Z L}{\frac{[P]}{\rho_0 g} - H_0 m \Delta Z} \right)^{\frac{1}{5-n}}, \quad M = \frac{2-n}{5-n},$$

где  $D_{kp}''$  – критический диаметр трубопровода, обусловленный максимально допустимым давлением потока;  $\rho_0$  – плотность жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения.

Таким образом, диаметр трубопровода из полимерных труб для системы водоснабжения выбирается по сортаменту, предоставленному заводом-изготовителем, из следующего диапазона:

$$\max\{D_{kp}', D_{kp}''\} \leq D. \quad (6)$$

Из неравенства (6) следует, что для выбора диаметра полимерного трубопровода необходимо определить, какой из рассматриваемых критических диаметров больше. Сравнивая нижние (рис. 1) и верхние (рис. 2) допустимые значения интервала изменения критического диаметра трубопровода, видим, что условие  $D_{kp}' \leq D_{kp}''$  выполняется не всегда. Зависимость величин  $D_{kp}'$  и  $D_{kp}''$  от уточненного расхода жидкости описывается степенными зависимостями с разными коэффициентами и показателями степени. Величина  $D_{kp}'$  описывается зависимостью с показателем степени 0,5, в то время как для величины  $D_{kp}''$  он не превышает 0,4 (рис. 3). Таким образом, условие выполнения неравенства  $D_{kp}' \leq D_{kp}''$  может быть записано следующим образом:

$$\frac{1}{\sqrt{[V]}} < W$$

или после несложных преобразований представлено в виде некоторой предельной расходно-напорной характеристики магистрали, ниже которой значащими при выборе диаметра трубопровода будут ограничения по давлению, а выше – ограничения по скорости:

$$\frac{[P]}{\rho_0 g} < [H]; \quad [H] = mk_Z L [V]^{\frac{5-n}{2}} + H_0 \pm \Delta Z.$$

При проектировочном расчете гидротранспортного комплекса критический диаметр трубопровода, рассматриваемый в ограничении (2), в случае использования методики А.Е. Смолдырева рассчитывается по формуле [9, 14]

$$D \leq D_{kp}; \quad D_{kp} = \left( \frac{q}{\sqrt{g} F} \right)^{0,4};$$

$$F = \sqrt[3]{qc'}\sqrt[3]{AS_2\Psi} + \sqrt{qc''}\sqrt{\sigma fAS_3}; \quad A = \frac{Ar(1-S_1)}{1+ArS_1}; \quad \Psi = \frac{w}{\sqrt{gd}}; \quad Ar = \frac{\rho_T - \rho_0}{\rho_0},$$

где  $q$  – коэффициент, учитывающий влияние материала трубы на критическую скорость, [1];  $S_1, S_2, S_3$  – объемные концентрации соответственно тонких, мелких и кусковых фракций;  $f$  – обобщенный коэффициент трения частиц о нижнюю стенку трубы;  $w$  – скорость стесненного падения частиц мелкой фракции;  $\sigma$  – эмпирический коэффициент, учитывающий изменение коэффициента трения кусковых частиц о дно трубы;  $\Psi$  – коэффициент фиктивного лобового сопротивления [2, 9, 11, 12, 14];  $d$  – средне-взвешенный диаметр частиц;  $Ar$  – параметр Архимеда;  $\rho_T$  – плотность частиц транспортируемого материала;  $\rho_0$  – плотность воды.

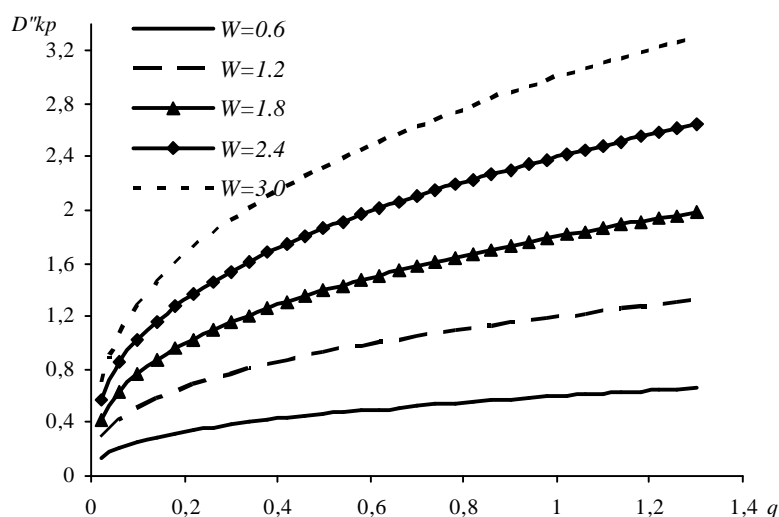


Рис. 2. Зависимость величины  $D''_{kp}$  от уточненного расхода жидкости при различных значениях  $W$

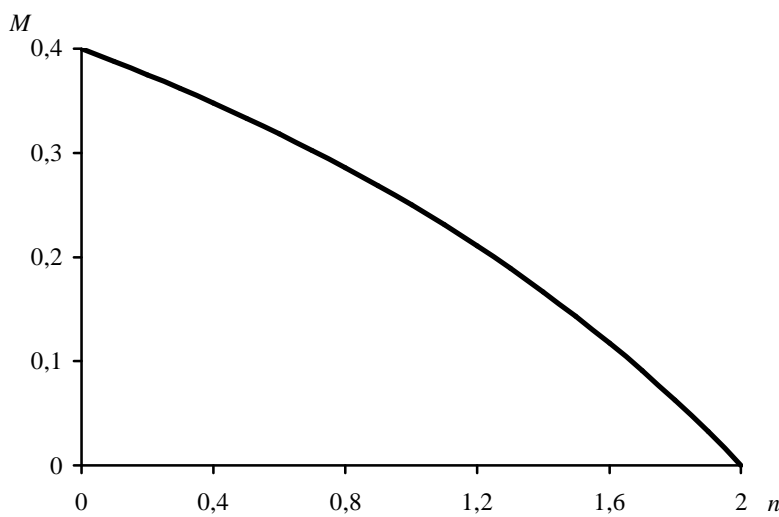


Рис. 3. Зависимость величины  $M$  от значения  $n$

Для труб из полимерных материалов среднее значение коэффициента  $q$  составляет  $1,216 \pm 0,033$  [1]. Вместо зависимости (5) для гидротранспортных комплексов используют более сложную формулу

$$i = i_0(1 + AS_1) + c_1AS_2 \frac{\Psi\sqrt{gD}}{V} + \sigma fAS_3,$$

которая после подстановки во второе из неравенств (1) позволяет получить второе ограничение для диаметра трубопровода в виде нелинейного неравенства

$$D^{7,5-n} - E_1 D^{5-n} + E_2 \leq 0; \quad (7)$$

$$E_1 = \frac{\frac{[P]}{\rho_0 g} - H_0 \mathbf{m} \Delta Z - \sigma f A S_3 k_Z L}{c_1 A S_2 \Psi \sqrt{g} k_Z L} q; \quad E_2 = \frac{m(1 + A S_1) q^{3-n}}{c_1 A S_2 \Psi \sqrt{g}}.$$

Решения неравенства (7) ограничивают величину диаметра трубопровода сверху и снизу

$$\langle D \rangle \leq D \leq [D],$$

однако определить их возможно исключительно численными методами на соответствующих промежутках:

$$(0; D_*) \text{ и } (D_*; D_{**});$$

$$D_{**} = \sqrt[5-n]{\frac{m(1 + A S_1) k_Z L q^{2-n}}{\frac{[P]}{\rho_0 g} - H_0 \mathbf{m} \Delta Z - \sigma f A S_3 k_Z L}}; \quad D_* = \left( \frac{5-n}{7,5-n} \frac{\frac{[P]}{\rho_0 g} - H_0 \mathbf{m} \Delta Z - \sigma f A S_3 k_Z L}{c_1 A S_2 \Psi \sqrt{g} k_Z L} q \right)^{0,4}.$$

Выбрав диаметр трубопровода по известным формулам гидравлики, легко рассчитать суммарный напор насосов и мощность насосных агрегатов [2, 9, 11 – 14].

Таким образом, по формулам, приведенным в статье, можно выполнить проекторочный расчет трубопроводных систем горного предприятия, подающих воду и гидросмеси. Отличительной особенностью приведенных формул является то, что они адаптированы к расчету критических диаметров и гидравлических уклонов для труб из полимерных материалов.

#### Список литературы

1. Семененко, Е.В. Расчет параметров гидротранспорта при использовании полиэтиленовых трубопроводов / Е.В. Семененко, Л.Г. Татарко // Геотехн. механика. – 2012. – 107. – Д.: ИГТМ НАН Украины, 2012. – С. 233 – 244.
2. Семененко, Е.В. Научные основы технологий гидромеханизации открытой разработки титан-цирконовых россыпей / Е. В. Семененко. – К.: Наук. думка, 2011. – 231 с.
3. Шурыгин, В.Д. Анализ способов повышения эффективности работы гидротранспортного комплекса / В.Д. Шурыгин, Е.В. Семененко, Н.А. Никифорова // Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2005. – №6. – С. 70 – 74.
4. Шурыгин, В.Д. Расчет параметров гидротранспортного комплекса при использовании полиэтиленовых труб / В.Д. Шурыгин, Е.В. Семененко // Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2007. – №2. – С. 71 – 74.
5. Шурыгин, В.Д. Износ полиэтиленовых труб при гидротранспорте исходных песков Малышевского месторождения / В.Д. Шурыгин, Е.В. Семененко // Металлургическая и горнорудная пром-сть. – 2007. – №6. – С. 90 – 93.
6. Швабауэр, В. Расчет гидравлических потерь давления в трубопроводе из пластмасс / В. Швабауэр, И. Гвоздев, М. Горилловский // Полимерные трубы. Украина. – 2006. – №1(1). – С. 46 – 52.
7. СНиП 2.04.01-85. Внутренний водопровод и канализация зданий. – М.: Госстрой СССР, 1985. – 67 с.
8. СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение наружные сети и сооружения. – М.: Госстрой СССР, 1984. – 176 с.
9. Дмитриев, Г.П. Напорные гидротранспортные системы / Г.П. Дмитриев, Л.И. Махарадзе, Т.Ш. Гочиташвили. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
10. ДСТУ Б В.2.7-151:2008. Труби поліетиленові для подачі холодної води. Технічні умови. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 39 с.
11. Коберник, С.Г. Напорный гидротранспорт хвостов горно-обогажительных комбинатов / С.Г. Коберник, В.И. Войтенко. – К.: Наук. думка, 1967. – 140 с.
12. Гидротранспорт (вопросы гидравлики) / Н.А. Силин, Ю.К. Витошкин, В.М. Карасик, В.Ф. Очеретько. – К.: Наук. думка, 1971. – 158 с.
13. Криль, С.И. Напорные взвесенесущие потоки / С.И. Криль. – К.: Наук. думка, 1990. – 160 с.
14. Смолдырев, А.Е. Гидро- и пневмотранспорт в металлургии / А. Е. Смолдырев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1985. – 383 с.
15. Альтшуль, А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

*Рекомендовано до друку проф. Надутим В.П.*