

Расчет гидравлических потерь давления в трубопроводе из пластмасс

Гидравлический расчет является важной составляющей процесса выбора типоразмера трубы для строительства трубопровода. В нормативной литературе по проектированию этот ясный с точки зрения физики вопрос основательно запутан. На наш взгляд, это связано с попыткой описать все варианты расчета коэффициента трения, зависящего от режима течения, типа жидкости и ее температуры, а также от шероховатости трубы, одним (на все случаи) уравнением с вариацией его параметров и введением всевозможных поправочных коэффициентов. При этом краткость изложения, присущая нормативному документу, делает выбор величин этих коэффициентов в значительной степени произвольным и чаще всего заканчивается номограммами, кочующими из одного документа в другой. С целью более подробного анализа предлагаемых в документах методов расчета представляется полезным вернуться к исходным уравнениям классической гидродинамики [1].

Потеря напора, связанная с преодолением сил трения при течении жидкости в трубе, определяется уравнением:

$$\Delta P = \lambda \frac{L}{D} \frac{\rho w^2}{2} \quad [\text{Н/м}^2, \text{Па}] \quad (1)$$

где: L и D длина трубопровода и его внутренний диаметр, м; ρ - плотность жидкости, кг/м³; w - средняя объемная скорость, м/сек, определяемая по расходу Q, м³/сек:

$$w = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

λ - коэффициент гидравлического трения, безразмерная величина, характеризующая соотношение сил трения и инерции, и именно ее определение и есть предмет гидравлического расчета трубопровода. Коэффициент трения зависит от режима течения, и для ламинарного и турбулентного потока определяется по-разному.

Для ламинарного (чисто вязкого режима течения) коэффициент трения определяется теоретически в соответствии с уравнением Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2)$$

где: Re - критерий Рейнольдса (число). Опытные данные строго подчиняются этому закону в пределах значений Рейнольдса ниже критического (Re < 2320).

При превышении этого значения возникает турбулентность. На первом этапе развития турбулентности (3000 < Re < 100000) коэффициент трения также очень точно определяется классическим уравнением Блязиуса:

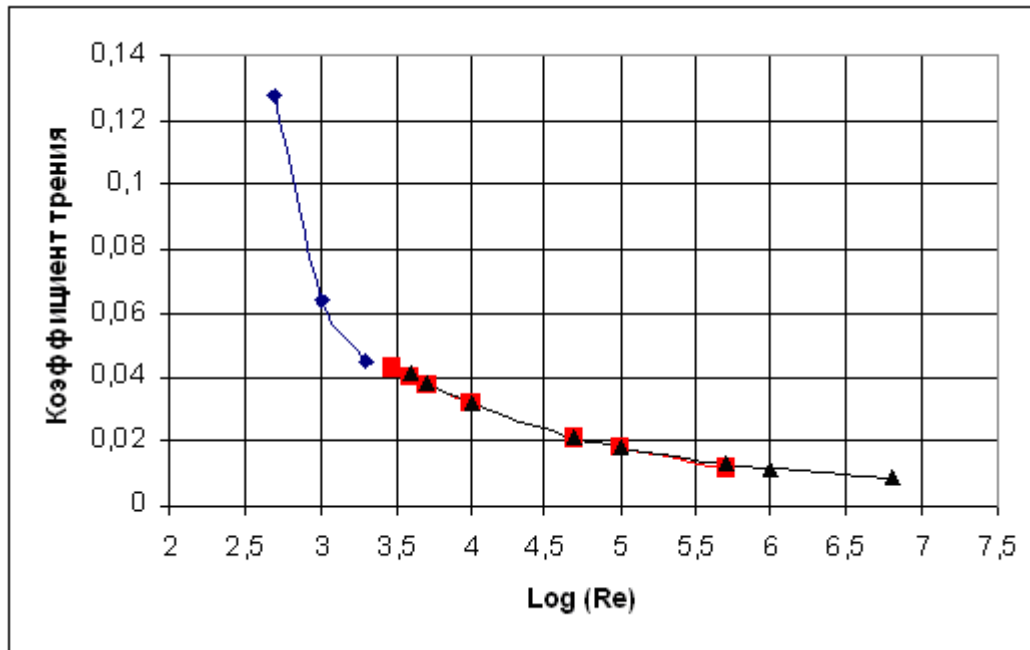
$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{-0,25}} \quad (3)$$

В несколько расширенном диапазоне чисел Рейнольдса (4000 < Re < 630000) применяют уравнение ВТИ, также ставшее классическим:

$$\lambda = 1,01 \lg(\text{Re})^{-2,5} \quad (4)$$

Для значений Re > 100000 предложено много расчетных формул, но практически все они дают один и тот же результат [1 - 3].

На рис.1 показано, как "работают" уравнения (2) - (4) в указанном диапазоне чисел Рейнольдса, который достаточен для описания всех реальных случаев течения жидкости в гидравлически гладких трубах.
Рис.1



Шероховатость стенки трубы влияет на гидравлическое сопротивление только при турбулентном потоке, но и в этом случае, из-за наличия ламинарного пограничного слоя существенно сказывается только при числах Рейнольдса, превышающих некоторое значение, зависящее от относительной шероховатости ξ/D , где ξ - расчетная высота бугорков шероховатости, м. Труба, для которой при течении жидкости выполняется условие:

$$Re < 27 (D/\xi)^{1,14} \quad (5)$$

считается гидравлически гладкой, и коэффициент трения определяется по уравнениям (2) - (4). Для чисел Re больше определенных неравенством (5) коэффициент трения становится величиной постоянной и определяется только относительной шероховатостью по уравнению:

$$\lambda = (1,74 + 2 * \lg(D/2/\xi))^{-2} ,$$

которое после преобразования дает:

$$\lambda = 0,5 / (\lg(3,7D/\xi))^2 \quad (6)$$

Гидравлическое понятие шероховатости не имеет ничего общего с геометрией внутренней поверхности трубы, которую можно было бы инструментально промерить. Исследователи наносили на внутреннюю поверхность модельных труб четко воспроизводимую и измеряемую зернистость, и сравнивали коэффициент трения для модельных и реальных технических труб в одних и тех же режимах течения. Этим определяли диапазон **эквивалентной гидравлической шероховатости**, которую следует принимать при гидравлических расчетах технических труб. Поэтому уравнение (6) точнее следует записать:

$$\lambda = 0,5 / (\lg(3,7D/\xi_{\text{э}}))^2 \quad (6')$$

где: $\xi_{\text{э}}$ - нормативная эквивалентная шероховатость (Таблица 1).

Таблица 1 [1, 2]

Вид трубопровода	$\xi_{\text{э}}$, мм
Стальные новые оцинкованные	0,1 - 0,2

Стальные старые, чугунные старые, керамические	0,8 - 1,0
Чугунные новые	0,3
Бетонированные каналы	0,8 - 9,0
Чистые трубы из стекла	0,0015 - 0,01
Резиновый шланг	0,01 - 0,03

Данные таблицы 1 получены для традиционных на тот период материалов трубопроводов. В период 1950-1975 годов западные гидродинамики аналогичным способом определили $\xi \varepsilon$ труб из полиэтилена и ПВХ разных диаметров, в том числе и после длительной эксплуатации. Получены значения эквивалентной шероховатости в пределах от 0,0015 до 0,0105 мм для труб диаметром от 50 до 300 мм [3]. В США для собранного на клеевых соединениях трубопровода из ПВХ этот показатель принимается 0,005 мм [3]. В Швеции, на основе фактических потерь давления в пятикилометровом трубопроводе из сваренных встык полиэтиленовых труб диаметром 1200 мм, определили, что $\xi \varepsilon = 0,05$ мм [3]. В российских строительных нормах в случаях, относящихся к полимерным трубам, их шероховатость либо совсем не упоминается [5 - 8], либо принимается: для водоснабжения и канализации - "не менее 0,01 мм" [9], для газоснабжения $\xi \varepsilon = 0,007$ мм [10]. Натурные измерения потерь давления на действующем газопроводе из полиэтиленовых труб наружным диаметром 225 мм длиной более 48 км показали, что $\xi \varepsilon < 0,005$ мм [11]. Вот, пожалуй, и все, чем положения классической гидродинамики могут помочь при анализе нормативной документации, посвященной гидравлическому расчету трубопроводов. Напомним, что

$$Re = w D / \nu \quad (7)$$

где: ν - кинематическая вязкость жидкости, м²/сек.

Первый вопрос, который следует решить раз и навсегда - являются ли полимерные трубы, имеющие, как показано выше, уровень шероховатости, от $\approx 0,005$ мм для труб малых диаметров, до $\approx 0,05$ мм для труб большого диаметра, гидравлически гладкими. В Таблице 2 для труб различных диаметров по уравнениям (5) и (7) определены значения расходных скоростей движения воды при температуре 20°C ($\nu = 1,02 \cdot 10^{-6}$ м²/сек), выше которых труба не может считаться гидравлически гладкой. Для полимерных труб шероховатость плавно повышали с увеличением диаметра, как это оговорено выше; для новых и старых стальных труб - принимали минимальные значения из Таблицы 1. Отметим, что критические скорости в старых стальных трубопроводах в 10 раз ниже, чем в новых, и их шероховатость не может не учитываться при расчете гидравлических потерь напора.

Таблица

D _{тр. вн.} , мм	полимерная		стальная			
	$\xi \varepsilon$, мм	w _{кр} , м/сек	новая		не новая	
			$\xi \varepsilon$, мм	w _{кр} , м/сек	$\xi \varepsilon$, мм	w _{кр} , м/сек
50	0,005	22	0,1	0,7	0,8	0,062
100	0,01	11	0,1	0,74	0,8	0,068
200	0,015	7,6	0,1	0,82	0,8	0,076
300	0,025	4,5	0,1	0,86	0,8	0,08
600	0,035	3,4	0,1	0,95	0,8	0,088
1200	0,05	2,5	0,1	1,0	0,8	0,095

Для трубопроводов внутри зданий предельными значениями скорости воды в трубопроводах являются: для отопительных систем - 1,5 м/сек [7]; для водопровода - 3 м/сек [8]. Для наружных сетей мы таких ограничений в нормативной документации [4 - 9] не нашли, но если оставаться в пределах, определенных таблицей 2, можно сделать однозначный вывод - полимерные трубы являются, безусловно, гладкими. Оставляя предельное значение скорости, $w = 3$ м/сек, определим, что при течении воды в трубах диаметром 20-1000 мм число Рейнольдса лежит в диапазоне 50000-2500000, то есть для расчета коэффициента трения течения воды в полимерных трубах вполне корректно использовать уравнения (3) и (4). Уравнение (4) вообще охватывает весь диапазон режимов течения. В нормативной документации, посвященной проектированию систем водоснабжения [4 - 9], уравнение для

определения удельных потерь напора (Па/м либо м/м) дается в развернутом относительно диаметра трубы и скорости движения воды виде:

$$J = K \cdot D^n \cdot w^m \quad (8)$$

где: K - набор всевозможных коэффициентов, n и m - показатели степеней при диаметре D, m и скорости w, м/сек.

Уравнение Блязиуса (3), наиболее удобное для подобного преобразования, для воды при 20°C при $3000 < Re < 100000$ принимает вид:

$$J = 5,13 \cdot 10^{-4} \cdot D^{-1,25} \cdot w^{1,75} \quad [м/м] \quad (3^1)$$

но оно действует при $Re < 100000$. Для расчетов при $Re > 100000$ следует пользоваться модификацией уравнения (4).

В ISO TR 10501 [4] для пластмассовых труб при $4000 < Re < 150000$ предлагается:

$$J = 5,37 \cdot 10^{-4} \cdot D^{-1,24} \cdot w^{1,76} \quad [м/м] \quad (9)$$

Для диапазона чисел Рейнольдса $150000 < Re < 1000000$ проводится незначительная модификация (см. рис. 1) уравнения:

$$J = 5,79 \cdot 10^{-4} \cdot D^{-1,20} \cdot w^{1,8} \quad [м/м] \quad (10)$$

СНиП 2.04.02-84 [8] без указания диапазона режима течения дает уравнение, которое подстановкой соответствующих коэффициентов для пластмассовых труб принимает вид:

$$J = 6,3 \cdot 10^{-4} \cdot D^{-1,226} \cdot w^{1,774} \quad [м/м] \quad (11)$$

СП 40-102-2000 [9] дает более громоздкое уравнение:

$$\lambda^{0,5} = \frac{0,5 \{ b/2 + [1,312 \cdot (2 - b) \cdot \lg(3,7 \cdot D / \xi_s) / (\lg Re_\phi - 1)] \}}{\lg(3,7 \cdot D / \xi_s)} \quad (12),$$

которое после проверки и выполнения различных условий, для ряда режимов течения воды в шероховатых трубах ($b \geq 2$) превращается в уравнение:

$$\lambda = 0,5 / (\lg(3,7D / \xi_s))^2$$

что в точности совпадает с уравнением (61)

Обозначения в уравнении (12) здесь не расшифровываем, потому что они многоступенчато зависят одно от другого и с трудом понимаются из текста оригинала.

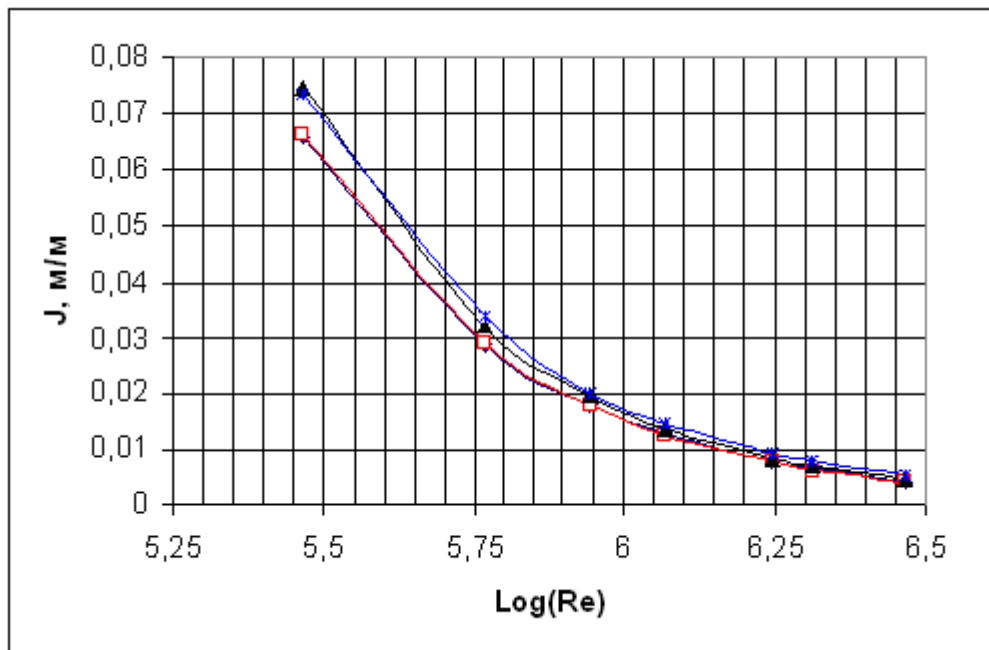
Таким образом, с небольшими вариациями коэффициентов и показателей степеней уравнения (9 - 12) базируются на классических уравнениях гидродинамики. Приняв скорость движения воды в трубопроводе $w=3$ м/сек, рассчитаем потери давления J, м/м (табл.3, рис.2) в полимерных трубах разных диаметров по четырем рассмотренным выше подходам. При расчетах по СП 40-102-2000 (уравнение 12) уровень шероховатости в зависимости от диаметра труб принимался как в **таблице 2**.

Таблица 3

D _{вн.} , мм	Q, м ³ /час	Re (*10 ⁵)	Потери напора, м/м			
			Классика	ISO TR 10501	СНиП 2.04.02	СП 40-102
20	3,4	0,586	0,462	0,475	0,535	0,47
100	85	2,93	0,065	0,066	0,074	0,073
200	340	5,86	0,029	0,029	0,032	0,033
300	763	8,8	0,017	0,017	0,019	0,02
600	3050	17,6	0,0078	0,0077	0,0082	0,0092
1000	8480	29,3	0,0043	0,0042	0,0044	0,0053

Рис.

2



Как видно из табл.3 и рис.2, расчеты по ISO TR 10501 практически совпадают с расчетами по уравнениям классической гидродинамики, расчеты по российским нормативным документам, также совпадая между собой, дают несущественно завышенные по сравнению с ними результаты. Непонятно, почему составители СП 40-102-2000 в части гидравлического расчета полимерного водопровода отошли от рекомендаций более раннего документа СНиП 2.04.02-84 и не учли рекомендаций международного документа ISO TR 10501. Уравнения (9 - 11) охватывают все реально возможные режимы течения воды в гладких трубах и удобны тем, что легко могут быть решены относительно любой входящей в них величины (J, w и D). Если это сделать относительно D:

$$D = [J/(K*w^m)]^{1/n} \quad (13)$$

где: K - коэффициент, а n и m - показатели степеней при диаметре D и скорости w, то можно предварительно выбрать диаметр трубопровода по рекомендованной для данного типа сети скорости w, м/сек, с учетом допустимых потерь напора для данной протяженности трубопровода ($\Delta H_g = J*L, м$).

Пример:

Определить внутренний диаметр пластмассового трубопровода длиной 1000 м, при $w_{\max} = 2$ м/сек и $\Delta H_g = 10$ м (1 бар), то есть $J = 10/1000 = 0,01$ м. Выбрав, например, коэффициенты уравнения (11), получаем:

$$D = [J/(K*w^m)]^{1/n} \quad (13)$$

При этом расход составит Q=460 м³/час. Если полученный расход велик или мал, достаточно скорректировать значение скорости. Взяв, например, w=1,5 м/сек, получим D=0,188 м и Q=200 м³/час. Расход в трубопроводе определяется потребностями потребителя и устанавливается на этапе проектирования сети. Оставив этот вопрос проектировщикам, сравним удельные потери давления в стальном (новом и старом) и пластмассовом трубопроводах при равных расходах для различных диаметров труб.

Таблица 4

Труба	Расход, м ³ /час	Скорость, м/с	Потери напор м/100м
Сталь новая 133х5	60	1,4	3,6
Сталь старая 133х5	60	1,4	6,84
ПЭ 100 110х6,6 (SDR 17)	60	2,26	4,1
ПЭ 80 110х8,1 (SDR 13,6)	60	2,41	4,8
Сталь новая 245х6	400	2,6	4,3
Сталь старая 245х6	400	2,6	7,0
ПЭ 100 225х13,4 (SDR 17)	400	3,6	4,0
ПЭ 80 225х16,6 (SDR 13,6)	400	3,85	4,8
Сталь новая 630х10	3000	2,85	1,33
Сталь старая 630х10	3000	2,85	1,98
ПЭ 100 560х33,2 (SDR 17)	3000	4,35	1,96
ПЭ 80 560х41,2 (SDR 13,6)	3000	4,65	2,3
Сталь новая 820х12	4000	2,23	0,6
Сталь старая 820х12	4000	2,23	0,87
ПЭ 100 800х47,4 (SDR 17)	4000	2,85	0,59
ПЭ 80 800х58,8 (SDR 13,6)	4000	3,0	0,69

Как видно из таблицы 4, учитывая неизбежное старение стальной трубы в процессе эксплуатации, для труб малых и средних диаметров полиэтиленовую трубу можно выбирать на одну ступень наружного диаметра меньше. И только для труб диаметром 800 мм и выше, вследствие относительно меньшего влияния абсолютной эквивалентной шероховатости на потери напора, диаметры труб нужно выбирать из одного ряда.

Литература.

1. Н.З.Френкель, Гидравлика, Госэнеоиздат, 1947.
2. И.Е.Идельчик, Справочник по гидравлическому сопротивлению фасонных и прямых частей трубопроводов, ЦАГИ, 1950.
3. L.-E. Janson, Plastics pipes for water supply and sewage disposal. Boras, Borealis, 4th edition, 2003.
4. ISO TR 10501 Thermoplastics pipes for the transport of liquids under pressure - Calculation of head losses.
5. СП 40-101-2000 Проектирование и монтаж трубопроводов из полипропилена "рандом сополимер".
6. СНиП 41-01-2003 (2.04.05-91) Отопление, вентиляция и кондиционирование.
7. СНиП 2.04.01-85 Внутренний водопровод и канализация зданий.
8. СНиП 2.04.02-84 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.
9. СП 40-102-2000 Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов.
10. СП 42-101-2003 Общие положения по проектированию и строительству газораспределительных систем из металлических и полиэтиленовых труб.
11. Е.Х.Китайцева, Гидравлический расчет стальных и полиэтиленовых газопроводов, Полимергаз, №1, 2000.

Авторы: Владимир Швабауэр, Игорь Гвоздев, Мирон Горилловский
Источник: (Журнал "Полимерные трубы")