

Зависимость значений гидравлического потенциала напорных труб из полимерных материалов от величины их фактических внутренних диаметров

О. А. Продоус, генеральный директор ООО «ИНКО-эксперт», г. Санкт-Петербург

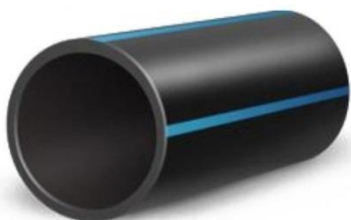
П. П. Якубчик, профессор ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», г. Санкт-Петербург

При гидравлическом расчете напорных трубопроводов (труб) из полимерных и металлополимерных материалов используется значение внутреннего диаметра, на величину которого оказывает влияние величина технологических допусков на толщину стенок труб и их номинальный наружный диаметр. Это приводит к тому, что изменяются фактический внутренний диаметр труб, потери напора по длине и величина фактически транспортируемого расхода.

Требуется уточнить значения величин технологических допусков на толщину стенок труб и их номинальный наружный диаметр для их последующего использования при гидравлических расчетах трубопроводов. Рекомендовано использовать экспериментально установленную математическую зависимость коэффициента эквивалентной шероховатости труб от величины высотного параметра шероховатости их внутренних стенок. Предложено разработать объединенные в одном издании «Таблицы для гидравлического расчета труб из разных видов полимерных и металлополимерных материалов».

Ключевые слова: *трубы из полимерных материалов, гидравлические сопротивления, шероховатость, технологические допуски.*

В настоящее время в России и за рубежом широко освоено производство труб из следующих видов полимерных материалов [1]:



Труба из полиэтилена низкого давления ПНД по ГОСТ 18599-2001 — **65–70%***.



Труба из поливинилхлорида ПВХ по ГОСТ 52134-2013 или молекулярно-ориентированного ПВХ-О 500 по ГОСТ 56927-2016 — **10–15%***.



Трубы из стеклопластика (СП)
по ГОСТ 32415-2013 — **8–10%***.



Труба чугунная из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом ВЧШГ с полиуретановым внутренним и наружным покрытием (ПУ) по EN 545-2010 — до **10%***.



Стальные электросварные трубы (СТ) с внутренним полимерным покрытием «Амеркот-391» по ГОСТ 20295-85 — **3–5%***.

*Доля в % от использования труб из конкретного вида материала.

Гидравлический расчет напорных трубопроводов (труб) производится по заданному расходу q и давлению P_N с целью определения потерь напора H по длине рассматриваемого участка для последующего выбора фактического внутреннего диаметра труб $d_{вн}^{\phi}$, потерь напора и характеристик насосного оборудования [2, 3].

Потери напора по длине рассматриваемого участка L для напорного движения определяются как:

$$H = i \cdot L, \text{ м,} \quad (1)$$

где:

i — потери напора по длине, м/м (мм/м);

L — длина рассматриваемого участка трубопровода, м.

Потери напора i (без учета гидравлических сопротивлений стыковых соединений) в трубах из напорного полиэтилена ПНД, поливинилхлорида ПВХ определяются в соответствии с действующими нормами [2, 3] по формуле Дарси-Вейсбаха, имеющей вид:

$$i = \lambda \frac{V_{\phi}^2}{2g \cdot d_{\text{вн}}^5}, \text{ мм/м (м/м)}, \quad (2)$$

где:

λ — коэффициент гидравлического сопротивления трения по длине трубопровода;

V_{ϕ} — фактическая скорость потока жидкости, м/с;

g — ускорение свободного падения, м/с²;

$d_{\text{вн}}^{\phi}$ — фактический внутренний диаметр трубопровода (труб), м.

Коэффициент гидравлического сопротивления λ , согласно требованиям нормативов [2, 3], следует определять по формуле:

$$\sqrt{\lambda} = \frac{0,5 \left[\frac{b}{2} + \frac{1,312(2-b) \cdot \lg \left(\frac{3,7 \cdot d_{\text{вн}}^{\phi}}{K_3} \right)}{\lg Re_{\phi} - 1} \right]}{\lg \left(\frac{3,7 \cdot d_{\text{вн}}^{\phi}}{K_3} \right)}, \quad (3)$$

где:

b — число подобия режимов движения жидкости;

K_3 — коэффициент эквивалентной шероховатости, м, принимаемый по нормативным требованиям [2, 3], значение не менее $K_3 \geq 0,00001$ м;

Re_{ϕ} — фактическое число Рейнольдса, $Re_{\phi} = \frac{V_{\phi} \cdot d_{\text{вн}}^{\phi}}{\nu}$,

где:

ν — коэффициент кинематической вязкости воды, м²/с.

Число подобия режимов движения жидкости определяется по формуле:

$$b = 1 + \frac{\lg Re_{\phi}}{\lg Re_{\text{кв}}},$$

где:

$Re_{\text{кв}}$ — число Рейнольдса, соответствующее началу квадратичной области гидравлических сопротивлений при турбулентном движении жидкости:

$$Re_{\text{кв}} = \frac{500 \cdot d_{\text{вн}}^{\phi}}{K_3}, \quad (4)$$

при $b > 2$ принимают $b = 2$ [4].

Достаточно сложный для использования вид формулы (3) при гидравлических расчетах позволил авторам [5] предложить упрощенный вид нормативной зависимости для определения значений коэффициента гидравлического сопротивления λ труб из любых видов полимерных материалов:

$$\lambda = \left[\frac{0,5 \left(\frac{b}{2} + \frac{1,312(2-b) \cdot m}{n} \right)}{m} \right]^2, \quad (5)$$

где:

$m = \lg \frac{3,7 \cdot d_{\text{вн}}^{\phi}}{K_s}$ — число подобия параметров трубопровода, отражающее изменения значений величины фактического внутреннего диаметра труб за счет влияния технологических допусков на толщину стенки и номинальный наружный диаметр труб (по стандартам на трубы из конкретного вида материала) и значения практической (измеренной) величины высотного параметра шероховатости внутренней поверхности труб Ra [4];

$n = \lg Re_{\phi} - 1$ — показатель, характеризующий изменение фактически транспортируемого расхода q_{ϕ} , в зависимости от изменения величины фактического внутреннего диаметра труб $d_{\text{вн}}^{\phi}$ и физических свойств жидкости.

Экспериментальными исследованиями, проведенными в разное время, установлено, что между коэффициентом эквивалентной шероховатости K_s и высотным параметром физической шероховатости внутренней поверхности труб Ra существует математическая зависимость, имеющая вид [6, 7, 8, 9]:

$$K_s = 2Ra^{1,33}, \text{ м}, \quad (6)$$

где:

Ra — среднеарифметическое абсолютное значение отклонений профиля поверхности от средней линии в пределах базовой длины, мкм (м).

Формула (6) позволяет без проведения трудоемких гидравлических экспериментов, замерив с помощью прибора лишь значение высотного параметра шероховатости Ra , определить значение коэффициента эквивалентной шероховатости K_s и далее вычислить значение коэффициента гидравлического сопротивления λ , используя государственную методику измерения параметров шероховатости МИ 41-75 [10].

Определив значения показателей b , m и n в формуле (5), переходят к определению значений величин коэффициента гидравлического сопротивления λ для труб из конкретного вида полимера (ПНД, ПВХ, СП, ПУ и др.).

При практическом расчете значений показателя $m = \lg \frac{3,7 \cdot d_{\text{вн}}^{\phi}}{K_s}$ возникает сложность, вызванная отсутствием в действующих нормативных требованиях [2, 3] точного значения величины K_s для труб из разных видов полимерных материалов. Это резко снижает точность выполнения гидравлических расчетов.

На основе проводимых авторами с 1976 года по настоящее время исследований установлено, что трубы из полимерных и металлополимерных материалов характеризуются различными значениями высотного параметра шероховатости Ra их внутренней поверхности.

В табл. 1 для конкретного номинального диаметра труб $d_n^H = 600$ мм при заданном расходе $q = 300$ л/с и давлении $PN = 1,0$ МПа приводится сравнение значений гидравлических характеристик труб (гидравлического потенциала) из различных видов полимерных материалов.

Под **гидравлическим потенциалом трубопровода** (труб) следует понимать: оценочный эксплуатационный критерий, характеризуемый совокупностью значений расхода q , л/с (m^3/c), при заданном давлении PN , МПа (kg/cm^2), фактической скорости потока жидкости V_ϕ , м/с, и величины фактических (с учетом допусков) потерь напора на трение по длине трубопровода i_ϕ , м/м (мм/м), из конкретного вида полимерного материала [4].

Анализ значений величин, характеризующих гидравлический потенциал сравниваемых труб (табл. 1), показывает, что при прочих равных условиях, за счет влияния технологических допусков фактическая толщина стенок (e) изменяется на 75,3% труб из ПНД, или в 4,05 раза удельные потери напора в этих трубах увеличиваются в 1,66 раза (на 39,87%) в сравнении с электросварными трубами того же диаметра.

При квадратичном режиме гидравлических сопротивлений труб из полимерных материалов основное влияние на формирование потерь напора оказывает шероховатость внутренних стенок [2, 3]. Значения величины параметра Ra отличаются для электросварных труб на 27,32%, или в 2,1 раза от значения параметра Ra для труб из ПНД. Удельные потери напора $1000 i$ также для сравниваемых стальных электросварных труб меньше на 39,87%, или в 1,66 раза, чем значения $1000 i$ для труб из ПНД (табл. 1).

Разброс значений K_3 в табл. 1 для труб из разных полимерных материалов колеблется в диапазоне значений от $K_3 = 0,0000196$ м до $K_3 = 0,0000292$ м, то есть значения отличаются на 32,88 %, или в 1,49 раза. Поэтому требуется обоснование значений величины параметра K_3 , используемого при гидравлических расчетах.

Знание точного значения величины K_3 возможно только при использовании зависимости (6), так как величина фактического расхода q_ϕ зависит от значения величины фактического внутреннего диаметра труб $d_{вн}^\phi$, влияющего на значение величины фактической скорости потока V_ϕ и фактических потерь напора на сопротивление по длине i_ϕ с учетом значений величин технологических допусков. Поэтому величина фактического расхода является функцией $q_\phi = f(i_\phi, d_{вн}^\phi)$ и должна определяться только по фактическому внутреннему диаметру $d_{вн}^\phi$.

Гидравлические характеристики труб из полимерных и металлополимерных материалов

Таблица 1

| Материал внутренней поверхности труб | Диаметр труб с учетом допусков | | | Номинальная толщина стенки e , мм | Шероховатость внутренней поверхности R_a , м | $K_9 = 2Ra^{1,33}$, м | Гидравлический потенциал труб и расчетные зависимости | | | | | | | | |
|--|--------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|--|------------------------|---|--|-------------|-----------|------|----------|----------|------------|--------------------|
| | номинальный наружный | номинальный внутренний | фактический внутренний | | | | расход q , м ³ /с | фактическая скорость потока V^Φ , м/с | Re_ϕ^* | $Re_{кв}$ | b | m | n | λ | 1000 i_ϕ мм/м |
| ПЭ-100 ПНД по ГОСТ 185992001 | 630,0 | 555,2 | 552,8 | 37,4 + 3,1* | 0,0000410 | 0,0000292 | 0,298 | 1,24 | 5,72 | 6,98 | 1,82 | 4,8 5 | 4,7 2 | 0,014 1 | 1,999 |
| ПВХ по ГОСТ 52134-2013 | 630,0 | 570,0 | 594,8 | 19,3 + 4,0* | 0,0000350 | 0,0000237 | 0,300 | 1,08 | 5,69 | 7,10 | 1,80 | 4,9 7 | 4,6 9 | 0,014 0 | 1,400 |
| ПВХ-О 500 по ГОСТ 56927-2016 | 630,0 | 591,4 | 608,6 | 19,3 + 4,0* | 0,0000350 | 0,0000237 | 0,300 | 1,03 | 5,68 | 7,19 | 1,79 | 4,9 8 | 4,6 8 | 0,014 2 | 1,265 |
| Стеклопластик по ГОСТ 32415-2013 | 630,0 | 591,4 | 568,1 | 30,0 + 1,9* | 0,0000370 | 0,0000255 | 0,299 | 1,18 | 5,71 | 7,05 | 1,81 | 4,9 2 | 4,7 1 | 0,014 0 | 1,749 |
| Стальные электросварные трубы с внутренним полимерным покрытием «Амеркот-391» по ГОСТ 20295-85 | 630,0 | 616,0 | 613,0 | 7,0 – 3,0* | 0,0000298 | 0,0000199 | 0,301 | 1,02 | 5,68 | 7,19 | 1,79 | 5,0 6 | 4,6 8 | 0,013 9 | 1,202 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|-------|-------|-------|------------|-----------|-----------|-------|------|------|------|------|----------|----------|------------|-------|
| ВЧШГ с полиуретанов ым покрытием по EN 545- 2010 | 635,0 | 616,8 | 619,7 | 6,7 + 1,9* | 0,0000304 | 0,0000196 | 0,299 | 0,99 | 5,67 | 7,20 | 1,79 | 5,0 6 | 4,6 7 | 0,013 9 | 1,118 |
|--|-------|-------|-------|------------|-----------|-----------|-------|------|------|------|------|----------|----------|------------|-------|

*Технологический допуск по стандартам [2, 3].

**При температуре воды $t = 10^{\circ}\text{C}$, $\nu = 0,00000131 \text{ м}^2/\text{с}$ [4].

На рис. 1 показано изменение значений q^ϕ для стальных электросварных труб с фактическим внутренним диаметром $d_{вн}^\phi = 0,613$ м и труб из ПНД с фактическим внутренним диаметром $d_{вн}^\phi = 0,5528$ м.

Графики зависимости $q_\phi = f(i_\phi, d_{вн}^\phi)$ построены для скоростного режима $V = 0,5; 1,5; 2,0; 2,5$ м/с, в трубах с номинальным наружным диаметром $d_{вн}^н = 630$ мм (табл. 2).

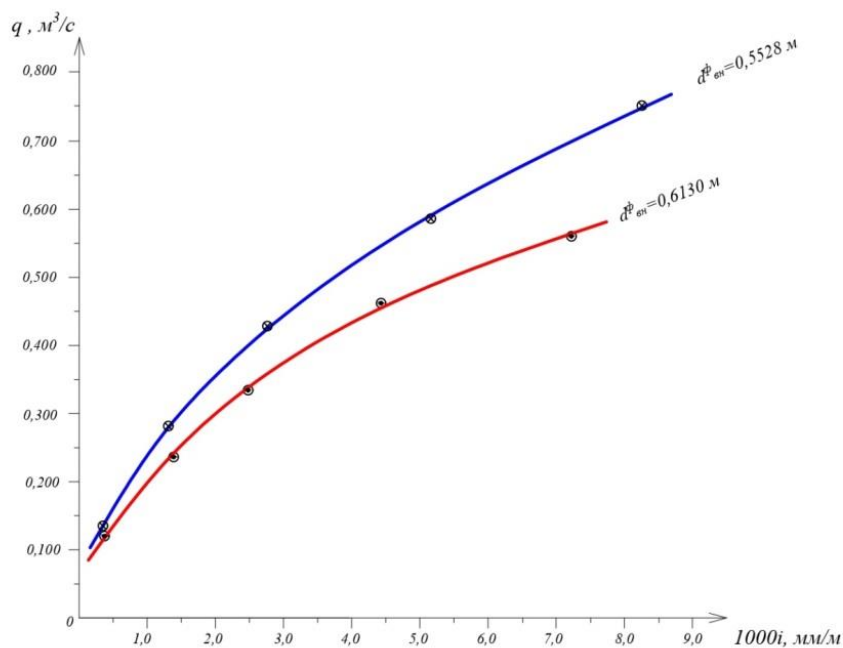


Рис. 1. График зависимости $q_\phi = f(i_\phi, d_{вн}^\phi)$ для сравниваемых труб

В табл. 2 приведены расчетные параметры для построения графиков зависимости $q_\phi = f(i_\phi, d_{вн}^\phi)$ для сравниваемых труб.

Таблица 2

| | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Расчетная скорость потока V , м/с | 0,5 | 1,0 | 1,5 | 2,0 | 2,5 |
| Фактический расход $q_\phi^{ПНД}$, $\text{м}^3/\text{с}$ | 0,147 | 0,295 | 0,443 | 0,590 | 0,738 |
| Фактический расход $q_\phi^{ст}$, $\text{м}^3/\text{с}$ | 0,120 | 0,240 | 0,360 | 0,480 | 0,600 |
| Удельные потери напора $1000 i_\phi^{ПНД}$, мм/м | 0,325 | 1,300 | 2,925 | 5,200 | 8,125 |
| Удельные потери напора $1000 i_\phi^{ст}$, мм/м | 0,289 | 1,156 | 2,600 | 4,623 | 7,223 |

Из графиков на рис. 1 и данных табл. 1 следует, что при одном и том же номинальном наружном диаметре труб $d_{вн}^н = 630$ мм и одном и том же скоростном режиме

в них изменяются фактические скорости потока с $V_{\phi}^{ПНД} = 1,24$ м/с до $V_{\phi}^{см} = 1,02$ м/с, то есть изменяются на 17,74 %, или в 1,22 раза.

На рис. 1 показано изменение значений q_{ϕ} для стальных электросварных труб с полимерным покрытием «Амеркот-391» с фактическим внутренним диаметром $d_{\text{вн}}^{\phi} = 0,613$ м и труб из ПНД с фактическим внутренним диаметром $d_{\text{вн}}^{\phi} = 0,5528$ м. Фактически перемещаемый расход q_{ϕ} по трубопроводу из электросварных труб с полимерным покрытием $q_{\phi}^{см}$ отличается на 1,0%, или в 1,01 раза от фактического значения величины расхода для труб из ПНД:

$$q_{\phi}^{см} = 0,301 \text{ м}^3/\text{с} > q_{\phi}^{ПНД} = 0,298 \text{ м}^3/\text{с} \text{ на } 1,0\%, \text{ или в } 1,01 \text{ раза.}$$

Представленные в статье данные являются основанием для следующих выводов:

1. Точность выполнения гидравлических расчетов напорных трубопроводов из полимерных и металлополимерных труб определяется точностью расчетов значений их фактических внутренних диаметров $d_{\text{вн}}^{\phi}$, зависящих от значений величин технологических допусков на толщину стенки труб e и их номинального наружного диаметра $d_{\text{н}}^{\text{н}}$.
2. Для уточнения значений величин технологических допусков требуется проведение специальных НИР и ОКР, по результатам которых в действующие стандарты на трубы могут быть внесены обоснованные уточненные значения параметров e и $d_{\text{н}}^{\text{н}}$, влияющие на точность выполнения гидравлических расчетов трубопроводов.
3. На основе проведения исследований значений параметров шероховатости внутренней поверхности труб из разных полимерных материалов необходимо разработать нормативные требования на величину значений величины коэффициента эквивалентной шероховатости K_s и внести их в действующий норматив СП 399.1325800.2018.
4. Для обоснования точного подбора диаметров труб из конкретных видов полимерных материалов необходимо разработать сводные (общие) «Таблицы для гидравлического расчета трубопроводов из разных видов полимерных и металлополимерных материалов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Продоус О. А., Иващенко В. В. Анализ характеристик стальных и чугунных металлополимерных труб для систем водоснабжения // Производственно-технический

- и научно-практический журнал «Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение», 2019/5 (137). — С. 52–56.
2. СП 40-102-2000 Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование и монтаж трубопроводов систем водоснабжения и канализации из полимерных материалов. Общие требования // М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2001.
 3. СП 399.1325800.2018 Системы водоснабжения и канализации наружные из полимерных материалов. Правила проектирования и монтажа // <http://docs.cntd.ru/document/552304873>.
 4. Продоус О. А. Таблицы для гидравлического расчета труб напорных из полиэтилена. Справочное пособие. Издание 3-е — дополненное // СПб.: ООО «Свое издательство», 2017. — 240 с. ил.
 5. Продоус О. А., Васильева М. А. Упрощенный вид нормативной зависимости для проведения гидравлических расчетов трубопроводов из полимерных материалов // Журнал «Водоснабжение и санитарная техника», № 9, 2017. — С. 53–55.
 6. Продоус О. А., Добромислов А. Я. О связи между эквивалентной равномернозернистой шероховатостью и параметрами физической шероховатости труб из различных материалов // Известия вузов. Строительство и архитектура, № 5, 1987.
 7. Продоус О. А., Добромислов А. Я., Шашкова И. Л. О качестве внутренней поверхности пластмассовых труб // Журнал «Водоснабжение и санитарная техника», № 5, 1987.
 8. Дикаревский В. С., Якубчик П. П., Продоус О. А. Гидравлические сопротивления железобетонных напорных труб с полимерной облицовкой внутренней поверхности // Известия вузов. Строительство и архитектура, № 11, 1981.
 9. Продоус О. А. Влияние колебаний значений параметров, входящих в нормативную зависимость СП 40-102-2000 на величину потерь напора в трубах из разных полимерных материалов // Журнал «Инженерные системы — АВОК Северо-Запад», № 4, 2019. — С. 50–53.
 10. Методика измерения параметров шероховатости поверхности по ГОСТ 2789-73 при помощи приборов профильного метода. МИ 41-75 // М.: Издательство стандартов, 1975. // <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293815/4293815845.htm>.