

ВЛИЯНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРУБ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ВЕЛИЧИНУ ФАКТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НАПОРА В ТРУБОПРОВОДАХ

О. А. Продоус, д. т. н., профессор, г. Санкт-Петербург

П. П. Якубчик, профессор кафедры «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика» ФГБОУ ВО ПГУПС Императора Александра I, г. Санкт-Петербург

Рабочей поверхностью труб из любых видов полимерных материалов является их внутренняя поверхность, характеризующая шероховатостью внутренних стенок, влияющей на величину потерь напора по длине трубопровода и затраты электроэнергии при его эксплуатации. Следствием существования разных технологий производства труб является выпуск труб с различной шероховатостью их внутренней поверхности. Поэтому при гидравлическом расчете труб (трубопроводов), согласно требованиям норматива СП 399.1325800.2018, это обстоятельство необходимо обязательно учитывать. Для повышения точности гидравлических расчетов труб из разных полимерных материалов разработан обоснованный диапазон фактических значений коэффициента гидравлической шероховатости, входящий в нормативную зависимость для определения значения коэффициента гидравлического сопротивления, без знания которого нельзя рассчитать потери напора по длине.*

Ключевые слова: гидравлический расчет труб, шероховатость, точность расчета, полимерные трубы, потери напора.

Обязательное проведение гидравлического расчета трубопроводов (труб) из разных видов полимерных материалов регламентировано (установлено) требованиями СП 399.1325800.2018, который проводится по методике [1], предусматривающей определение значения коэффициента гидравлического сопротивления по формуле (1) или по упрощенной авторами формуле (2) для последующего вычисления по формуле Дарси — Вейсбаха фактических удельных потерь напора по длине i_ϕ [2, 3, 4]:

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

* Гидравлическая шероховатость — это критерий, входящий в расчетную формулу (1)

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

где:

$m = lg \frac{3,7 \cdot d_{\text{вн}}^{\phi}}{K_3}$ — число подобия параметров трубопровода, отражающее изменение

внутреннего диаметра $d_{\text{вн}}^{\phi}$ в зависимости от влияния технологических допусков при производстве труб из конкретного вида полимерного материала и величины высотного параметра шероховатости внутренних стенок труб;

K_3 — коэффициент гидравлической шероховатости внутренней поверхности стенок труб, м;

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

V_{ϕ} — фактическая скорость потока с учетом изменения значений фактического внутреннего диаметра труб $d_{\text{вн}}^{\phi}$, м/с;

ν — коэффициент кинематической вязкости воды, зависящий от ее температуры, м²/с; ν — берется из специальных таблиц;

$b = 1 + \frac{lg \cdot Re_{\phi}}{lg \cdot Re_{\text{кр}}}$ — некоторое число подобия режимов движения жидкости.

При условии $b > 2$, значение b принимается равным 2;

$Re_{\text{кр}} = \frac{500 \cdot d_{\text{вн}}^{\phi}}{K_3}$ — число Рейнольдса, соответствующее началу квадратичной области гидравлических сопротивлений.

В расчетную формулу (1) входит коэффициент гидравлической шероховатости стенок труб K_3 , значение которого, согласно требованиям СП 399.1325800.2018, для труб из любых видов полимерных материалов рекомендовано принимать не менее $K_3 \geq 0,00001$ м [1]. То есть для труб из разных видов полимерных материалов нормативом рекомендовано использовать одно и то же значение K_3 при изменяющихся значениях фактического внутреннего диаметра труб $d_{\text{вн}}^{\phi}$ [5, 6].

Проведение большого числа натуральных гидравлических экспериментов на трубах из разных материалов позволило авторам установить в 1978 году математическую зависимость $K_3 = f(Ra)$, позволяющую использовать измеренную прибором величину высотного параметра шероховатости стенок труб Ra для расчета по формуле (2) точного значения величины K_3 [3]. Установленная экспериментально математическая зависимость имеет вид:

$$K_3 = 2 Ra^{1,33}, \text{ мкм (мм, м)}, \quad (3)$$

где:

Ra — высотная характеристика шероховатости — среднеарифметическое абсолютное значение отклонений профиля от средней линии в пределах базовой длины [3].

На рис. 1 по данным табл. 1 построен график зависимости $K_3 = f(Ra)$, показывающий, что чем большее значение имеет высотный параметр Ra , тем большее значение имеет коэффициент гидравлической шероховатости K_3 .

Изменение значений K_3 при разной шероховатости стенок труб характеризуется изменением значения высотного параметра шероховатости Ra .

Таблица 1

Характеристики труб	Значения величины параметров				
Ra , мкм	0,25	0,33	0,37	0,41	0,45
K_3 , мкм	0,32	0,46	0,53	0,61	0,69

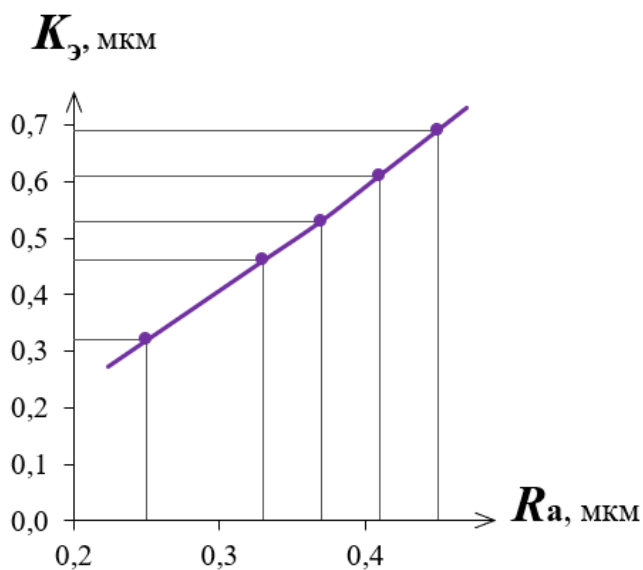


Рис. 1. График зависимости $K_3 = f(Ra)$

Такой подход является более совершенным в гидравлических расчетах трубопроводов из полимерных материалов. Значение коэффициентов гидравлической шероховатости стенок труб из полимерных материалов играет определяющую роль при расчете значений коэффициента гидравлического сопротивления λ , который входит в формулу Дарси — Вейсбаха для расчета удельных фактических потерь напора по длине:

$$i_\phi = \lambda \frac{v_\phi^2}{2g \cdot d_{\text{вн}}^\phi}, \text{ мм/м (м/м)}, \quad (4)$$

где:

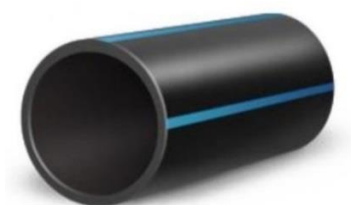
λ — безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления;

V_{ϕ} — фактическая скорость потока, рассчитанная с учетом фактического внутреннего диаметра d_{ϕ} с учетом технологических допусков на толщину стенок и наружный диаметр труб по стандарту, м/с;

d_{ϕ} — фактический внутренний диаметр труб с учетом технологических допусков по стандарту, м;

g — ускорение свободного падения, м/с².

В настоящее время промышленность серийно выпускает трубы из следующих видов полимерных и металлополимерных материалов, для которых установлены точные значения высотного параметра шероховатости Ra :



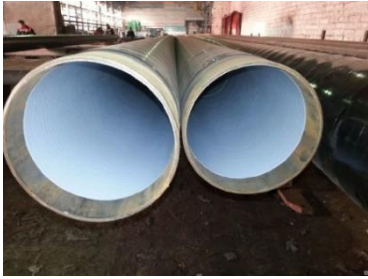
— труба из полиэтилена ПНД
по ГОСТ 18599-2001, $Ra = 0,410$ мкм;



— труба из поливинилхлорида ПВХ по
ГОСТ 52134-2013 и из молекулярно
ориентированного ПВХ-О 500 по ГОСТ Р 56927-
2016, $Ra = 0,350$ мкм;



— трубы из стеклопластика (СП) по
ГОСТ 32415-2013, $Ra = 0,370$ мкм;



— стальные электросварные трубы (СТ) с внутренним полимерным покрытием «Амеркот-391» по ГОСТ 20295-85, $Ra = 0,298$ мкм;



— труба чугунная из высокопрочного чугуна ВЧШГ с полиуретановым внутренним и наружным покрытием по EN 545-2010, $Ra = 0,304$ мкм.

Технологической особенностью производства труб из приведенных материалов является колебание величин номинального наружного диаметра d_n и толщин стенок труб e за счет допусков Δe , предусмотренных стандартами на эти трубы. На рис. 2 приведены геометрические характеристики труб из полимерных материалов.

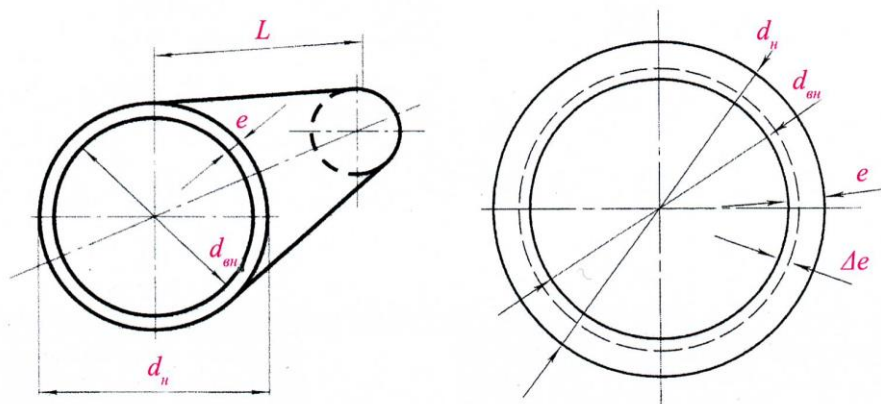


Рис. 2. Геометрические характеристики труб

В табл. 2 приведен диапазон измеренных и расчетных значений параметров труб из приведенных полимерных материалов.

Таблица 2. Диапазон значений параметров труб из разных полимерных материалов

Высотный диаметр шероховатости стенок труб по ГОСТ 2789-73, Ra , мкм	0,250	0,270	0,290	0,310	0,330	0,350	0,370	0,390	0,410	0,430
Эквивалентная шероховатость $K_s = 2Ra^{1,33}$, мкм	0,316	0,350	0,386	0,422	0,458	0,494	0,532	0,572	0,610	0,650

Разброс значений параметра Ra свидетельствует о необходимости пересмотра и уточнения конкретных значений коэффициентов гидравлической шероховатости K_s стенок труб из разных видов полимерных материалов. Это позволит избежать неоправданных ошибок при гидравлических расчетах трубопроводов.

Анализ фактических значений параметров труб, приведенных в табл. 2, показывает, что значения коэффициента гидравлической шероховатости K_s для труб из разных видов полимерных материалов в 3,16–6,50 раза больше рекомендованного нормативом значения $K_s \geq 0,00001$ м [1].

По результатам исследований большего количества образцов полимерных труб, подвергнутых анализу, в табл. 3 приведены значения величин параметра Ra , рекомендуемые для использования при расчетах значений K_s по формуле (3).

Таблица 3. Значения гидравлических параметров труб, рекомендуемые при расчетах

Параметры труб	Материал внутренней поверхности труб				
	ПНД ПЭ-100	ПВХ и ПВХ-О 500	СП стеклопластик	покрытие «Амеркот» на стальной поверхности	ВЧШГ ^{ПУ} полиуретан
Ra , мкм	0,410	0,350	0,370	0,298	0,304
K_s , мкм	0,610	0,494	0,532	0,400	0,410

Анализ значений величин параметра Ra для исследованных образцов труб из разных видов полимерных и металлополимерных материалов показывает, что значение K_s в нормативе [1] соответствует значениям, вычисляемым по формуле (2):

$$Ra = \sqrt[1,33]{\frac{K_s}{2}} = \sqrt[1,33]{\frac{10,0}{2}} = 3,35 \text{ мкм.}$$

Это свидетельствует о том, что **нормативное значение $K_3 \geq 0,00001$ м для приведенных материалов завышено по величине на 87,8–91,1%, или в 7,97–11,24 раза.**

Рекомендованный нормативом [1] диапазон значений коэффициента гидравлической шероховатости K_3 , следует незамедлительно пересмотреть и уточнить, так как использование рекомендованного диапазона значений K_3 приводит к большим погрешностям при гидравлических расчетах трубопроводов из полимерных материалов [2, 5, 6].

В табл. 4 приведена оценка точности расчета значений удельных потерь напора $1000 i$ для трубопровода диаметром 630 мм ($d_{вн}^{\phi} = 0,5528$ м) из напорного полиэтилена ПНД при использовании полиэтилена ПНД РЕ 100 для значения $K_3^н$ по нормативу $K_3^н = 0,00001$ м и экспериментально установленного фактического значения $K_3^{\phi} = 0,00003$ м.

Таблица 4. Величины расчетных параметров труб, определенные с учетом двух значений величин коэффициента $K_3^н$ и K_3^{ϕ}

Материал труб	Вычисляемые параметры										Процент расхождения значений i , %
	$d_{вн}^{\phi}$, м	V_{ϕ} , м/с	Re_{ϕ}	$Re_{кв}$	K_3	b	m	n	λ	$1000 i$, мм/м	
Полиэтилен низкого давления	При значении $K_3^н = 0,00001$ м										64,48%
	0,5528	1,25	527481	946575342	0,00001	1,64	2,31	4,72	0,05176	7,46	
ПНД РЕ 1000 по ГОСТ 18-599-2001	При значении $K_3^{\phi} = 0,00003$ м										
	0,5528	1,25	527481	921333333	0,00003	1,64	4,78	4,72	0,01844	2,65	

Из табл. 4 следует, что при использовании нормативного значения $K_3^н = 0,00001$ м расчетные удельные потери напора $1000 i$ на 64,48% больше (в 2,82 раза), чем при использовании фактически установленного значения $K_3^ф = 0,00003$ м. Точность расчета удельных потерь напора $1000 i$ при использовании значения $K_3^н$ в 2,82 раза меньше (на 64,48%), чем при использовании значения $K_3^ф$.

Поэтому выбор значений коэффициента гидравлической шероховатости K_3 из разных полимерных и металлополимерных материалов является следствием обязательного первоначального проведения измерений с помощью приборов профильного метода значения высотных фактических характеристик шероховатости внутренних стенок труб. Зная величину значения Ra , по формуле (3) легко рассчитывается значение $K_3^ф$.

Считаем необходимым рекомендовать Федеральному автономному учреждению «Федеральный центр нормирования, стандартизации и технической оценки соответствия в строительстве» (ФАУ «ФЦС») принять к рассмотрению предложения, изложенные в данной статье.

Представленные данные позволяют сделать следующие выводы:

- Точность гидравлического расчета трубопроводов из разных полимерных материалов зависит от точности значений характеристик, входящих в нормативную расчетную зависимость (1). Чем точнее расчетное значение коэффициента гидравлической шероховатости K_3 , тем точнее будет определена величина коэффициента гидравлического сопротивления λ и, соответственно, тем точнее рассчитано значение фактических потерь напора по длине $i_ф$, влияющих на выбор характеристик удельных насосных агрегатов.
- Требуется установить (разработать) точные значения величин коэффициента гидравлической шероховатости K_3 для **труб из разных видов полимерных материалов** для расчета коэффициента гидравлического сопротивления λ и определения фактических удельных потерь напора по длине $i_ф$, придав им статус нормативных значений.
- Требуется также разработка и внесение в стандарты на трубы из разных видов полимерных и металлополимерных материалов диапазона фактических значений параметров шероховатости стенок труб Ra * и Sm с минимальными удельными потерями напора на сопротивления по длине $i_ф$.
- Требуется разработать и включить в стандарты на трубы из разных полимерных материалов методику производственного контроля значений высотного и шагового параметров шероховатости Ra и Sm для внесения результатов контроля в паспорт трубной продукции из конкретного вида полимерных материалов с последующим использованием паспортных значений при проведении гидравлического расчета труб (трубопроводов).

- Для обоснования выбора диаметров труб из различных видов полимерных и металлополимерных материалов требуется разработать общие (сводные) «Таблицы для гидравлического расчета труб из полимерных материалов» и придать им статус нормативного документа.

* Понятия эффективная шероховатость и эффективная скорость потока даны в Справочном пособии [7].

ЛИТЕРАТУРА

1. Продоус О. А., Якубчик П. П. Гидравлический расчет трубопроводов из полимерных материалов с учетом параметров шероховатости внутренней поверхности труб // Журнал «Водоснабжение и санитарная техника» № 11, 2020. — С. 55–60.
2. Свод правил СП 399.1325800.2018. Системы водоснабжения и канализации наружные из полимерных материалов. Правила проектирования и монтажа. Официальное издание. Москва. Стандартинформ. 2019.
<https://docs.cntd.ru/document/552304873?ysclid=lb9v8fd2a4713686994>
3. 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.
4. Продоус О. А., Терехов Л. Д. Сравнительная оценка величин потерь напора для обоснования выбора материала труб из разных полимерных материалов // Журнал «Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение», № 9 (129), 2018. — С. 44–48.
5. Продоус О. А., Терехов Л. Д., Смолин Е. С. Анализ зарубежных и отечественных расчетных зависимостей для определения потерь напора в трубопроводах из полимерных материалов // Журнал «Водоснабжение и санитарная техника», № 1, 2019. — С. 56–60.
6. Продоус О. А., Терехов Л. Д. Пропускная способность напорных трубопроводов из полимерных материалов // Журнал «Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение», № 5 (137), 2019. — С. 52–56.
7. Продоус О. А. Таблицы для гидравлического расчета труб напорных из полиэтилена. Справочное пособие. Издание 3-е дополненное // ООО «Свое издательство». Санкт-Петербург. 2017. — 240 с. ил.